

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY**

**A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ**

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

**ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ**

DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

**SADA PŘÍPRAVKŮ PRO DEMONSTRACI ZÁKLADNÍCH  
KLÍČOVACÍCH TECHNIK**

DEMONSTRATION SET FOR BASIC KEYING TECHNIQUES

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

BACHELOR'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

**Lukáš Žlebek**

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

**Ing. Radim Číž, Ph.D.**

**BRNO 2016**



# Bakalářská práce

bakalářský studijní obor **Teleinformatika**

Ústav telekomunikací

**Student:** Lukáš Žlebek

**ID:** 164446

**Ročník:** 3

**Akademický rok:** 2015/16

**NÁZEV TÉMATU:**

## Sada přípravků pro demonstraci základních klíčovacích technik

### POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Navrhněte a zhotovte sadu přípravků pro demonstraci základních klíčovacích technik, konkrétně generátor nosné a klíčovacího signálu a modulátor pro dvoustavové fázové klíčování. Oba přípravky budou uzpůsobeny pro napájení ze symetrického zdroje napětí  $\pm 12$  V. Generátor bude zdrojem harmonického nosného signálu a obdélníkového datového signálu reprezentujícího volitelnou, 8bitovou, periodicky se opakující posloupnost. Nosný signál bude mít amplitudu 5 V a kmitočet 10 kHz. Datový signál s úrovněmi +5 V a 0 V bude mít dvě volitelné bitové rychlosti, 5 kbit/s a 2 kbit/s, a jeho hrany budou synchronní s maximy nosného signálu. Modulátor bude pracovat se vstupním datovým a nosným signálem z generátoru a na jeho výstupu bude odpovídající dvoustavový fázově klíčovaný signál.

Vytvořte zadání a podrobný postup měření laboratorní úlohy pro demonstraci základních klíčovacích technik a vypracujte i její vzorové řešení.

### DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] PUNČOCHÁŘ, J. Operační zesilovače v elektronice. 5. vyd., Praha : BEN, 2002. 495 s. ISBN 80-7300-059-8.

[2] MATOUŠEK, D. Číslicová technika - základy konstruktérské praxe. 1. vyd., Praha : BEN, 2002. 207 s. 80-7300-025-3.

**Termín zadání:** 1.2.2016

**Termín odevzdání:** 1.6.2016

**Vedoucí práce:** Ing. Radim Číž, Ph.D.

**Konzultant bakalářské práce:**

**doc. Ing. Jiří Mišurec, CSc., předseda oborové rady**

### UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

## ABSTRAKT

Tato práce se zabývá konstrukcí sady prototypů laboratorních přípravků, pro ukázkou základních metod digitálních modulací. Hlavním přípravkem je generátor nosné a klíčovacího signálu, který generuje cyklicky se opakující data, a nosný signál. Další dva přípravky jsou modulátory ASK a BPSK. V teoretické části je popsán základní přehled modulací a samotný návrh přípravků. Praktická část ověřovacím měřením dokazuje funkce jednotlivých bloků generátoru a funkci modulátorů. V závěru je vypracovaná předloha pro laboratorní úlohu a její vzorové řešení.

## KLÍČOVÁ SLOVA

Digitální modulace, generátor, modulátor, nosný signál, modulační signál, schéma, laboratorní přípravek, ASK, BPSK, klíčování.

## ABSTRACT

This thesis concerns itself with construction of a set of laboratory products, used for demonstrating the basic methods of digital modulation. The primary product, is a generator of carrier and keying signals, which generates cyclically repeated data, and a carrier signal. Another two products are ASK and BPSK modulators. The theoretical part of this thesis describes a basic summary of different kinds of modulation and the design of all the product prototypes themselves. The practical part proves the functionality of individual components of the generator and the functionality of the modulators. In the last part of this thesis, there is a proposal of the laboratory task and its sample solution.

## KEYWORDS

Digital modulation, generator, modulator, carrier signal, modulating signal, scheme, laboratory product, ASK, BPSK, keying.

ŽLEBEK, Lukáš *Sada přípravků pro demonstraci základních klíčovacích technik*: bakalářská práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací, 2016. 68 s. Vedoucí práce byl Ing. Radim Číž, Ph.D.

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma „Sada přípravků pro demonstraci základních klíčovacích technik“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Brno .....

.....

podpis autora

## PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu bakalářské práce panu Ing. Radimu Čížovi, Ph.D. za odborné vedení, konzultace, trpělivost a podnětné návrhy k práci.

Brno .....

.....

podpis autora

## PODĚKOVÁNÍ

Výzkum popsáný v této bakalářské práci byl realizován v laboratořích podpořených z projektu SIX; registrační číslo CZ.1.05/2.1.00/03.0072, operační program Výzkum a vývoj pro inovace.

Brno .....

.....  
podpis autora

# OBSAH

<b>Úvod</b>	<b>12</b>
<b>1 Teoretická část bakalářské práce</b>	<b>13</b>
1.1 Definice modulace a její základní techniky . . . . .	13
1.1.1 Digitální modulace . . . . .	14
1.2 Přípravek pro generování nosné a klíčovacího signálu . . . . .	16
1.2.1 Oscilátor . . . . .	17
1.2.2 Fázový posun . . . . .	19
1.2.3 Komparátor s nulovou úrovní . . . . .	20
1.2.4 Dělička kmitočtu . . . . .	21
1.2.5 Bitová posloupnost . . . . .	21
1.2.6 Napájecí část . . . . .	23
1.3 Přípravek pro ASK a BPSK modulaci . . . . .	24
<b>2 Praktická část bakalářské práce</b>	<b>25</b>
2.1 Konstrukce generátoru . . . . .	25
2.1.1 Oživení hlavních bloků desky . . . . .	26
2.1.2 Oživení napájecí části . . . . .	26
2.1.3 Nastavení oscilátoru . . . . .	27
2.1.4 Nastavení fázového posunu . . . . .	28
2.1.5 Nastavení komparátoru s nulovou úrovní . . . . .	28
2.1.6 Nastavení děličky kmitočtu . . . . .	29
2.1.7 Nastavení bitové posloupnosti . . . . .	31
2.2 Konstrukce modulátoru . . . . .	32
2.3 Ověření funkčnosti při ASK a BPSK modulaci . . . . .	33
2.4 Laboratorní úloha . . . . .	35
<b>3 Závěr</b>	<b>36</b>
<b>Literatura</b>	<b>37</b>
<b>Seznam zkratk</b>	<b>38</b>
<b>Seznam příloh</b>	<b>39</b>
<b>A Zadání laboratorní úlohy</b>	<b>40</b>
<b>B Protokol o měření</b>	<b>47</b>



C	Vzorové vypracování	52
D	Schémata	55
E	Osazovací plány	58
F	Desky plošných spojů	60
G	Potisky panelů	62
H	Rozpiska součástek generátoru	65
I	Rozpiska součástek ASK a BPSK modulátoru	67
J	Obsah přiloženého CD	68

# SEZNAM OBRÁZKŮ

1.1	Schématická značka modulace. . . . .	13
1.2	Typy digitálních modulací.[1] . . . . .	15
1.3	Konstelační diagramy BPSK, QPSK, 8PSK a 16PSK. . . . .	15
1.4	Blokové schéma zapojení. . . . .	16
1.5	Schéma oscilátoru. . . . .	18
1.6	Schéma fázového posunu. . . . .	20
1.7	Schéma komparátoru s nulovou úrovní. . . . .	20
1.8	Schéma děličky kmitočtu. . . . .	21
1.9	Schéma rotujícího posuvného registru a výstupního zesilovače. . . . .	22
1.10	Schéma napájecího zdroje. . . . .	23
1.11	Schéma ASK a BPSK modulátoru . . . . .	24
2.1	Pohled na panel generátoru. . . . .	25
2.2	Správně nastavený průběh signálu oscilátoru. . . . .	27
2.3	Správně nastavený fázový posun. . . . .	28
2.4	Výstupní průběh z komparátoru. . . . .	29
2.5	Dělení kmitočtu dvěma. . . . .	30
2.6	Dělení kmitočtu pěti. . . . .	30
2.7	Zvolená kombinace bitů 00110011. . . . .	31
2.8	Pohled na panel ASK modulátoru. . . . .	32
2.9	Pohled na panel BPSK modulátoru. . . . .	32
2.10	První kanál zobrazuje signál nosný s frekvencí 10 kHz, druhý kanál modulační signál 00110101, a na třetím kanálu je modulovaný signál ASK. . . . .	34
2.11	První kanál zobrazuje signál nosný s frekvencí 10 kHz, druhý kanál modulační signál 00110101, a na třetím kanálu je modulovaný signál BPSK. . . . .	34
A.1	Modulační a ASK modulovaný signál.[1] . . . . .	42
A.2	Spektrum ASK modulace.[1] . . . . .	42
A.3	Modulační a BPSK modulovaný signál.[1] . . . . .	44
A.4	Spektrum BPSK modulace.[1] . . . . .	44
A.5	Modulační a FSK modulovaný signál.[1] . . . . .	45
A.6	Spektrum FSK modulace.[1] . . . . .	46
D.1	Schéma základní desky generátoru. . . . .	55
D.2	Schéma pomocné desky generátoru. . . . .	56
D.3	Schéma desky ASK a BPSK modulátoru. . . . .	57
E.1	Osazovací plán hlavní desky generátoru. . . . .	58
E.2	Osazovací plán pomocné desky generátoru. . . . .	59

E.3	Osazovací plán ASK a BPSK modulátoru. . . . .	59
F.1	DPS hlavní desky generátoru v měřítku 1:1, skutečný rozměr je 150,5x78 mm. . . . .	60
F.2	DPS pomocné desky generátoru v měřítku 1:1, skutečný rozměr je 85x35,5 mm. . . . .	61
F.3	DPS ASK a BPSK modulátoru v měřítku 1:1, skutečný rozměr je 56x52 mm. . . . .	61
G.1	Potisk panelu generátoru v měřítku 1:1, skutečný rozměr je 152x68 mm. . . . .	62
G.2	Potisk panelu ASK modulátoru v měřítku 1:1, skutečný rozměr je 152x68 mm. . . . .	63
G.3	Potisk panelu BPSK modulátoru v měřítku 1:1, skutečný rozměr je 152x68 mm. . . . .	64

# ÚVOD

Hlavním úkolem této práce je zkonstruovat sadu přípravků pro ukázkou základních metod digitálních modulací. Prvním je přípravek pro generování nosného a modulačního signálu. Pomocí tohoto přípravku budou následně buzeny dva samostatné modulátory vytvářející ASK a BPSK modulaci. Modulace je v dnešní době využívána stále častěji při přenosu informací, aby byl přenos co nejefektivnější daným přenosovým prostředím.

Tato práce obsahuje konkrétní postupy teoretického zpracování, konstrukci a ověření správné funkce. V úvodní části teoretického zpracování se nachází seznámení s modulací a jejími základními typy. Dále je popsán konkrétní typ modulace, jelikož přípravek neumožňuje práci se všemi typy modulací. V další části je rozebrán postup a vysvětleno celé zapojení i s některými výpočty jednotlivých součástí.

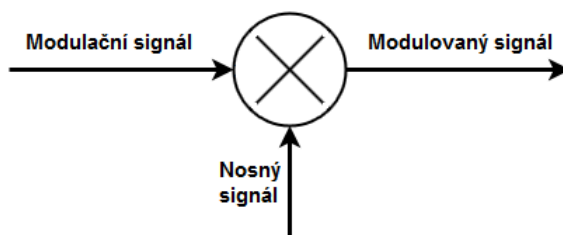
Praktická část je věnována konstrukci a ověření správné funkce generátoru a následném zapojení společně s modulátory. Pomocí této práce je možné celou sestavu sestavit, postupně ji i správně nastavit, a ověřit správnou funkčnost generování a modulování signálů.

V příloze se nachází vzorové zadání a vypracování laboratorní úlohy, pro kterou je tato sada přípravků sestavena.

# 1 TEORETICKÁ ČÁST BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

## 1.1 Definice modulace a její základní techniky

Modulace je nelineární proces, kterým se mění charakter vhodného nosného signálu pomocí modulačního signálu. Nosný signál je ten, který se moduluje modulačním signálem a zpravidla má vyšší frekvenci než signál modulační. Modulačním signálem jsou data, která se mají namodulovat na nosný signál.



Obr. 1.1: Schématická značka modulace.

Zařízení, které umožňuje provádět modulaci se nazývá modulátor. Vyskytuje se nejčastěji ve vysílačích. Aby bylo možné z modulovaného signálu dostat potřebné informace, musíme modulovaný signál demodulovat. O tuto funkci se stará demodulátor na straně přijímače. Modulace se užívá především kvůli efektivitě přenosu. Ne vždy jsou mnohé přenosové cesty v základním pásmu z hlediska fyzikálních vlastností vyhovující, a proto se využívá takzvaný přenos v přeloženém pásmu (modulace signálů), při kterém je přenášen takový signál, který se daným přenosovým médiem šíří nejlépe. S modulací se setkáváme v oblastech teleinformatiky při přenosu optických nebo elektrických signálů. Například pro přenos signálů AM/FM rádia, DVB, GSM a Wi-Fi. Pro tyto technologie jsou využity různé techniky modulací. Z toho plyne, že existuje mnoho druhů technik modulací, a ty v základu dělíme na:

- Analogové modulace
- Digitální modulace
- Diskrétní modulace
- Složené modulace

Jelikož je zařízení výhradně zkonstruováno pro ukázkou a práci s digitálními modulacemi, je uveden pouze tento blok informací.

### 1.1.1 Digitální modulace

Tyto modulace mají nosný signál s harmonickým průběhem a signál modulační je diskrétní neboli digitální. Digitální modulace se také často nazývá klíčování (angl. Keying). Tato modulace vznikla s příchodem digitální techniky, aby bylo možné přenášet digitální informace daným přenosovým kanálem. Mezi základní dělení modulací tohoto typu patří:

- Amplitudové klíčování (angl. Amplitude Shift Keying ASK)
- Frekvenční klíčování (angl. Frequency Shift Keying FSK)
- Fázové klíčování (angl. Phase Shift Keying PSK)

**Amplitudové klíčování** - Tato modulace zobrazuje digitální data díky změnám amplitudy nosné vlny. Používá se konečný počet amplitud, a každé z nich je přiřazen určitý vzorek binárních čísel. ASK je poměrně jednoduché, stejně jako AM, a je také náchylná k chybám při náhle vznikajících změnách.

**Frekvenční klíčování** - Je nelineární metoda, u které se přenáší digitální informace pomocí diskrétních změn frekvence nosné vlny. Základní FSK je binární FSK (BFSK). BFSK používá dvě frekvence k přenosu binární informace. Pro přenos symbolu 1 se užívá značkovácí frekvence a pro symbol 0 mezerová frekvence.

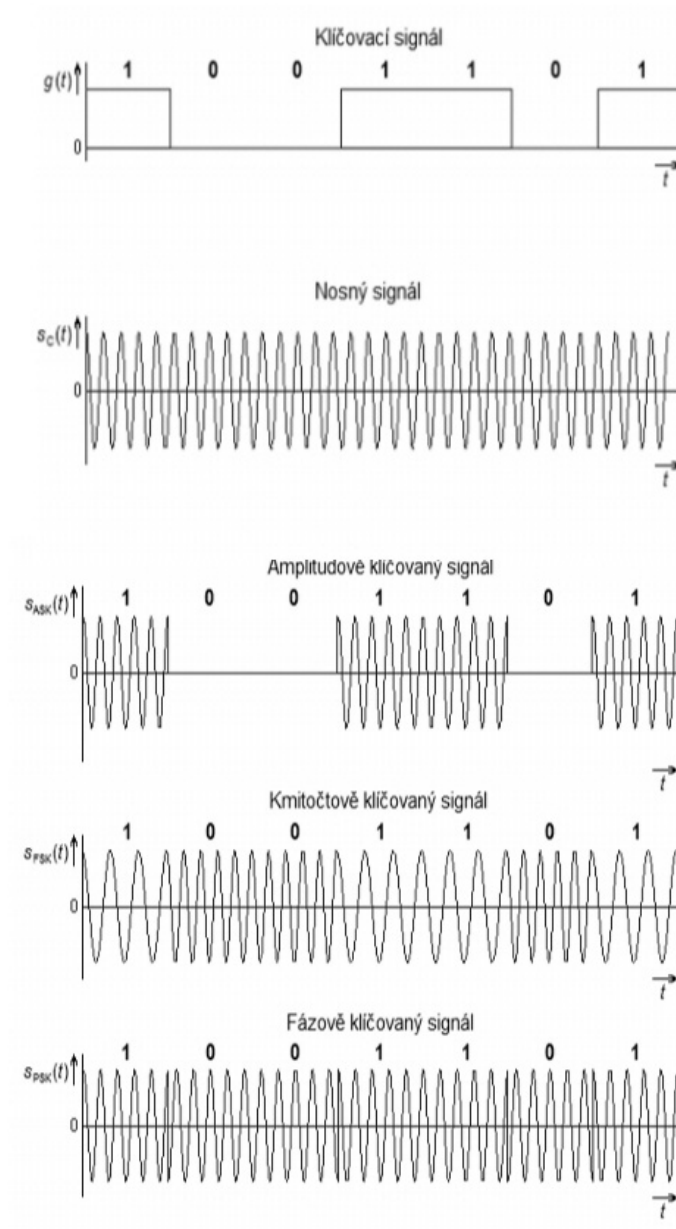
**Fázové klíčování** - Digitální data se přenášejí pomocí změn fáze nosného signálu, přičemž se amplituda ani frekvence nosné nemění. PSK je lineární a odvíjí se od počtu stavů, které je daná modulace schopna přenést. K základním typům se řadí:

- Dvoustavové fázové klíčování (BPSK - Binary Phase Shift Keying)
- Čtyřstavové fázové klíčování (QPSK - Quadrature Phase Shift Keying)
- Vícestavové fázové klíčování (8PSK, 16PSK)

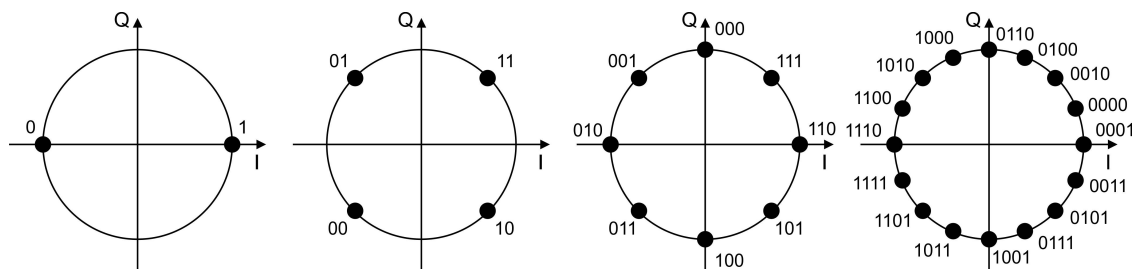
**Dvoustavové fázové klíčování** - BPSK je založená na posunutí fáze harmonické nosné o  $0^\circ$  nebo  $180^\circ$  v závislosti na hodnotě binárních dat.

**Čtyřstavové fázové klíčování** - QPSK funguje na podobném principu jako BPSK. Využívá ovšem čtyři fázové posuvy, vždy po  $90^\circ$  krocích. Díky tomu dokáže přenést současně dva bity v jednom signálovém prvku.

**Vícestavové fázové klíčování** - Tento typ klíčování navazuje na QPSK, ale používá více stavů, díky kterým dokáže přenést více bitů v jednom signálovém prvku. Typickým představitelem je 8PSK, kde se využívá osmi stavů a tím dochází k přenosu třech bitů najednou a 16PSK umožňující přenos čtyř bitů v jednom okamžiku.



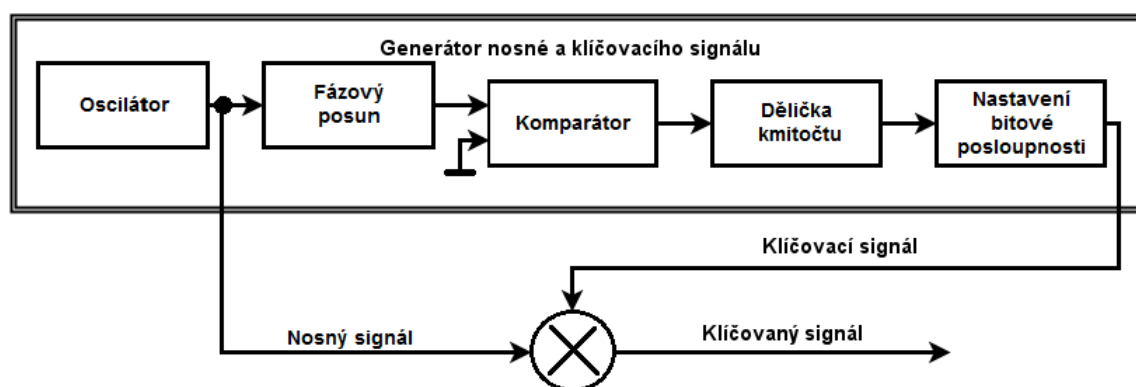
Obr. 1.2: Typy digitálních modulací.[1]



Obr. 1.3: Konstelační diagramy BPSK, QPSK, 8PSK a 16PSK.

## 1.2 Přípravek pro generování nosné a klíčovacího signálu

Tento laboratorní přípravek je sestaven z bloků viz obr. 1.4. Jednotlivé bloky jsou popsány níže, kde základ tvoří oscilátor generující harmonický nosný signál s frekvencí 10 kHz a amplitudou 5 V. Poté je signál upraven fázovým posunem v rozsahu  $0^\circ$  až  $180^\circ$  kvůli synchronizaci datového signálu s maximy nosného signálu. Fázově posunutý signál se dále komparátorem porovnává s nulovou úrovní, takže na výstupu získáváme ze sinusového signálu signál obdélníkový se stejnou fází. Obdélníkový signál z komparátoru se dále zpracovává v děličce kmitočtu, která má nastaveny dvě rychlosti. První rychlost je  $f/2$  a druhá  $f/5$ . Podle zvolené rychlosti generuje 8bitovou periodicky se opakující posloupnost dat, které lze libovolně navolit pomocí přepínačů. Tato posloupnost dat je ve výsledku klíčovacím signálem. Přípravek je napájený ze symetrického zdroje napětí  $\pm 12$  V.



Obr. 1.4: Blokové schéma zapojení.



### 1.2.1 Oscilátor

Pro funkci generování harmonického (sinusového) signálu slouží oscilátor s Wienovým článkem. Jedná se o zpětnovazební oscilátor, kde je jeho zpětná vazba tvořena Wienovým článkem. Oscilátor bude kmitat, pokud se splní dvě podmínky vzniku oscilací [3]. Jednou z nich je amplitudová podmínka:

$$A\beta = 1 \quad (1.1)$$

A fázová podmínka:

$$\varphi = 2k\pi \quad (1.2)$$

Po několika odvozeních vzorce fázové podmínky dospějeme k závěru, že bude splněna na kmitočtu:

$$f_{\text{osc}} = \frac{1}{2\pi RC} \quad (1.3)$$

Pokud je fázová podmínka splněna, tak vychází napěťový přenos Wienova článku:

$$\beta = \frac{1}{3} \quad (1.4)$$

Z toho plyne, že pro splnění amplitudové podmínky je potřeba, aby měl zesilovač nastaveno minimální zesílení  $A = 3$ . Pokud tato hodnota bude menší, oscilace zaniknou. Zapojení oscilátoru vychází z doporučené literatury[2], stačí pouze přepočítat hodnoty součástek pro zadané hodnoty:  $f_{\text{osc}} = 10 \text{ kHz}$ ,  $U = 5 \text{ V}$ . Díky tolerancím součástek při reálném zapojení nelze dosáhnout přesných výsledků výpočtů. Proto se hodnoty rezistorů, pro nastavení frekvence a zesílení zvolí menší než je vypočítaná hodnota a k nim se do série zapojí trimr. Ten bude mít velikost odporu takovou, aby vypočítaná hodnota odpovídala sériovému odporu rezistoru a trimru nastaveného na střed. Tímto způsobem se při oživení oscilátoru naladí přesné hodnoty frekvence a napětí. Nutnou podmínkou je, aby hodnota rezistoru byla větší než hodnota trimru, tím bude možné výsledný signál jemně nastavit.

Pro výpočet hodnot Wienova článku použijeme vzorec 1.3, kde si hodnotu kondenzátoru zvolíme  $C = 1,5 \text{ nF}$ , potom:

$$R = \frac{1}{2\pi f_{\text{osc}} C} \quad (1.5)$$

Po dosazení vyjde hodnota  $R = 10,1 \text{ k}\Omega$ .

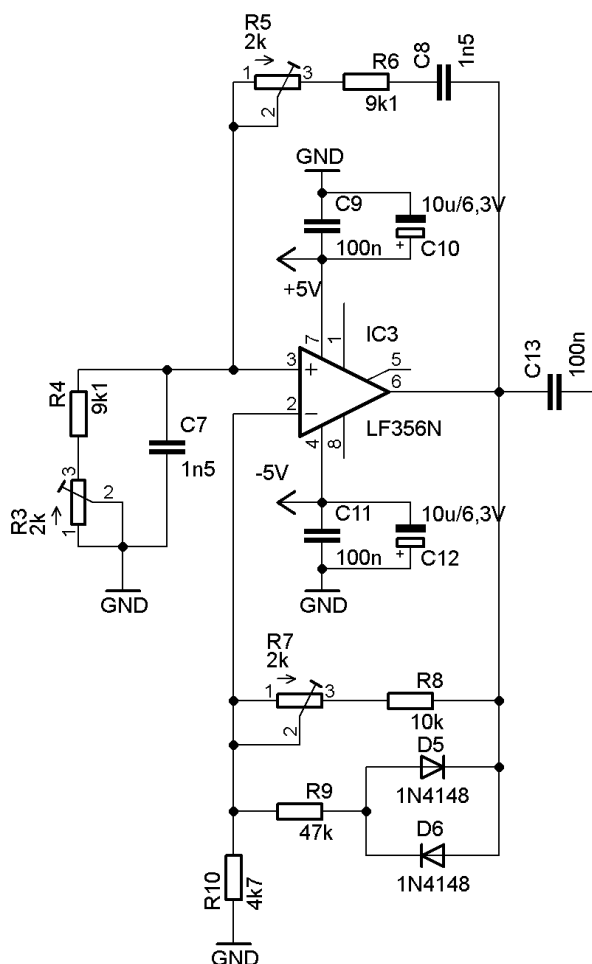
Pro podmínku vzniku oscilací musí být zesílení operačního zesilovače minimálně  $A = 3$ .

$$A = \frac{U_O}{U_I} \quad (1.6)$$

Dosazením dostaneme hodnotu  $U_I = 1,6666 \text{ V}$ . Zvolíme rezistor  $R_{10} = 4,7 \text{ k}\Omega$ . A vzorec pro výpočet neinvertujícího zesilovače upravíme na tvar:

$$R_{7,8} = \frac{R_{10}(U_O - U_I)}{U_I} \quad (1.7)$$

Výsledkem je hodnota celkového odporu  $R_{7,8} = 9,4 \text{ k}\Omega$ , což je minimální hodnota odporu ve zpětné vazbě, aby byla splněna amplitudová podmínka. Proto hodnotu odporu zvolíme vyšší viz obr.1.5



Obr. 1.5: Schéma oscilátoru.

### 1.2.2 Fázový posun

Fázový posun je vytvořen pomocí dvou integračních RC článků za sebou a následným zesílením fázově posunutého signálu. Na každém integračním článku je možné dosáhnout posunutí fáze až o  $90^\circ$ . Z fázové charakteristiky integračního článku je patrné, že pokud je frekvence vstupního signálu větší než mezní frekvence integračního článku, je fázový posuv od  $45^\circ$  do  $90^\circ$ . Jelikož zapojení integračního článku se chová jako dolní propust signálu a vstupní frekvence je vyšší než je mezní, signál se tlumí strmostí  $-20\text{ dB/dekádu}$ . Pokud je ale frekvence vstupního signálu nižší než je frekvence mezní, fázový posun je od  $0^\circ$  do  $45^\circ$ . A napěťový přenos je tlumen maximálně  $-3\text{ dB}$ . Aby bylo možné fázi měnit, je v zapojení použit tandemový potenciometr, který mění odpor obou integračních článků najednou a na výstupu se tak oba dva fázové posuvy sčítají. Pro výpočet je zvolen potenciometr  $2 \times 10\text{ k}\Omega$ , u kterého se počítá se střední hodnotou tj.  $5\text{ k}\Omega$ , protože při výpočtu mezní frekvence je fázový posun roven  $45^\circ$ . Mezní kmitočet je  $10\text{ kHz}$ . Pomocí upraveného vzorce 1.3 se vypočítá hodnota kondenzátoru:

$$C_{14,15} = \frac{1}{2\pi R f_{\text{mez}}} \quad (1.8)$$

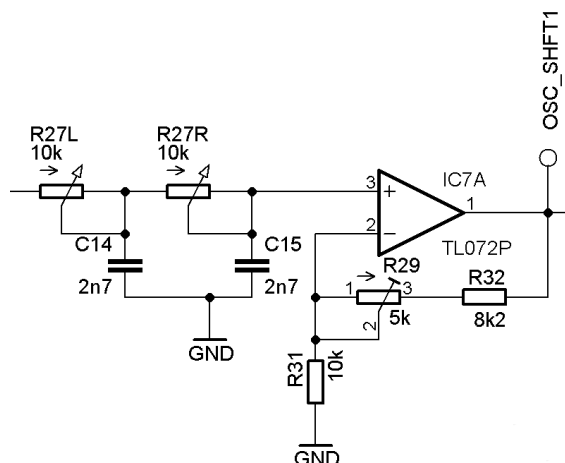
Výsledkem je hodnota  $C_{14,15} = 3,1\text{ nF}$ . Je zvolený dostupnější, s blízkou hodnotou  $2,7\text{ nF}$ .

Za předpokladu, že je celkový fázový posun nastavený na  $90^\circ$  napěťový přenos bude  $-6\text{ dB}$ . Výsledkem toho je, že na výstupu by byla amplituda  $2,5\text{ V}$ . Proto je třeba zesílit signál zpátky na amplitudu  $5\text{ V}$ . Zesílení signálu fázového posunu je pomocí neinvertujícího operačního zesilovače s proměnným nastavením zesílení. Opět bude u nastavení zesílení použita kombinace rezistoru a trimru pro jemné nastavení. Zvolíme rezistor  $R_{31} = 10\text{ k}\Omega$  a druhý odpor se vypočítá pomocí vztahu:

$$R_{29,32} = \frac{R_{31}(U_O - U_I)}{U_I} \quad (1.9)$$

kde  $U_O = 5\text{ V}$ ,  $U_I = 2,5\text{ V}$ .

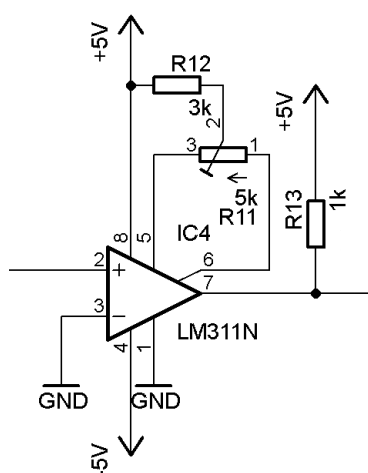
Hodnota celkového odporu je  $R_{29,32} = 10\text{ k}\Omega$  a ta se rozdělí na trimr o celkové hodnotě  $R_{29} = 5\text{ k}\Omega$  a rezistor  $R_{32} = 8,2\text{ k}\Omega$ .



Obr. 1.6: Schéma fázového posunu.

### 1.2.3 Komparátor s nulovou úrovní

Komparátor tvoří operační zesilovač zapojený podle katalogového listu obvodu LM311. Ten porovnává napětí mezi svými vstupy a vyhodnocuje jej na výstupu, kde záporný vstup je připojen na zem a kladný vstup na výstup z fázového posunu. Pokud je tedy na kladném vstupu hodnota napětí větší než na záporném vstupu tj. (kladná půlperioda), je na výstupu kladné napětí, pokud je na kladném vstupu nižší hodnota tj. (záporná půlperioda), je na výstupu z komparátoru napětí nulové. Tímto se sinusový signál změní na obdélníkový. Rezistory  $R_{11}$  a  $R_{12}$  se nastavuje vstupní offset operačního zesilovače. Jejich hodnoty jsou dány katalogovým listem.[4]



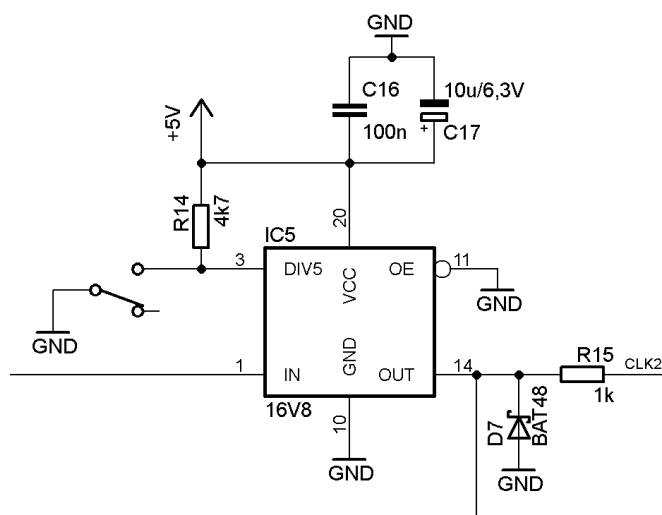
Obr. 1.7: Schéma komparátoru s nulovou úrovní.

### 1.2.4 Dělička kmitočtu

Signál z komparátoru je přiveden na vstup děličky kmitočtu, kde se dělí:

- Dvěma, je-li na vstupu DIV5 úroveň L, je střída signálu na výstupu 50% a kmitočet 5 kHz
- Pěti, je-li na vstupu DIV5 úroveň H, je střída signálu na výstupu 20% a kmitočet 2 kHz

Signál za děličkou je zároveň hodinovým signálem pro připojení dalších přípravků k tomuto generátoru. Hlavním obvodem děličky je programovatelný logický obvod GAL16V8.[5] Programovatelný logický obvod (PLD - Programmable Logic Device) je obvod pro vytváření digitálních obvodů. PLD může být jakkoliv naprogramován, pokud to splňuje architektura konkrétního obvodu.



Obr. 1.8: Schéma děličky kmitočtu.

### 1.2.5 Bitová posloupnost

Pro generování posloupnosti dat je použit PLD obvod GAL22V10[6] naprogramován jako cyklický posuvný registr. Tento registr je 8bitový, kde se jednotlivé bity na vstupu I0 až I7 nastavují pomocí přepínačů. Registr čte hodnoty ze svých vstupů a podle rychlosti hodinového signálu jej zapisuje sériově na výstup. LSB bitu odpovídá vstupní port I0 a MSB bitu port I7. Pokud je na vstupním portu I0 přepínač sepnutý k zemi tzn. je na něm log.0, bude na výstupu z registru na pozici LSB log.0.

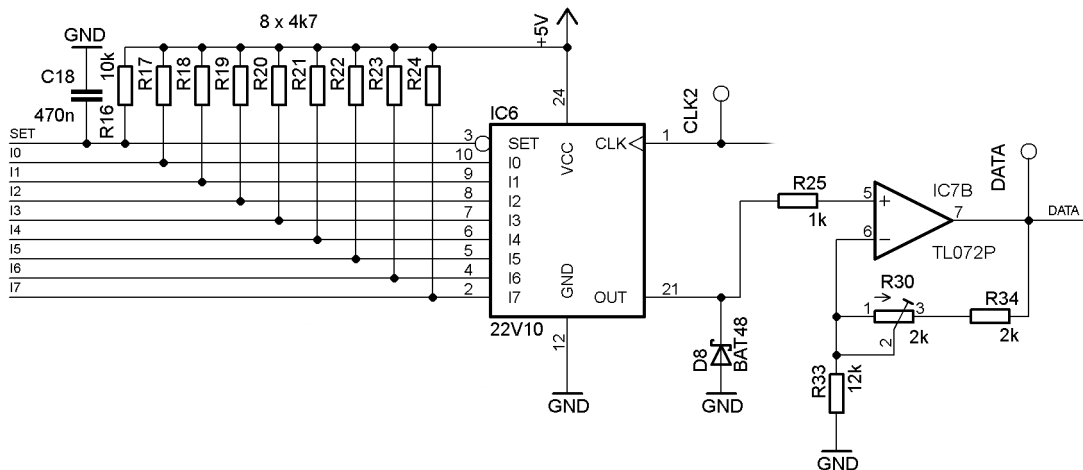
Pokud je spínač rozepnut, přes rezistor se na vstupu I0 objeví napětí kolem 5 V a registr jej vyhodnotí jako log.1 a tu zapíše na svůj výstup.

Registr pracuje cyklicky podle rychlosti hodinových pulzů. Zvolenou rychlost určuje poměr děličky kmitočtu, kde výsledný bitový tok při dělení dvěma je 5 kbit/s a při dělení pěti je 2 kbit/s. Registr má ještě nastavovací vstup celé bitové posloupnosti, protože pokud dojde ke změně logické hodnoty na jeho vstupech, registr pracuje neustále beze změny, dokud nedojde k sepnutí nastavovacího portu, čímž nastaví změněné hodnoty.

K výstupu z PLD je připojen neinvertující operační zesilovač. Výstup z PLD totiž není přizpůsobený pro malé impedance, a při připojení takového zařízení by došlo k nadměrnému zatížení výstupu PLD a mohlo by dojít k jeho zničení. Proto je zde použit operační zesilovač, který má vysokou vstupní impedanci. Zapojení je navrženo tak, aby bylo možné nastavit výstupní napětí přesně na požadovanou hodnotu. Opět je pro nastavení zesílení použita kombinace rezistoru a trimru pro jemné nastavení. Zvolený rezistor má hodnotu  $R_{33} = 12 \text{ k}\Omega$  a druhý odpor se vypočítá pomocí vztahu:

$$R_{30,34} = \frac{R_{33}(U_O - U_I)}{U_I} \quad (1.10)$$

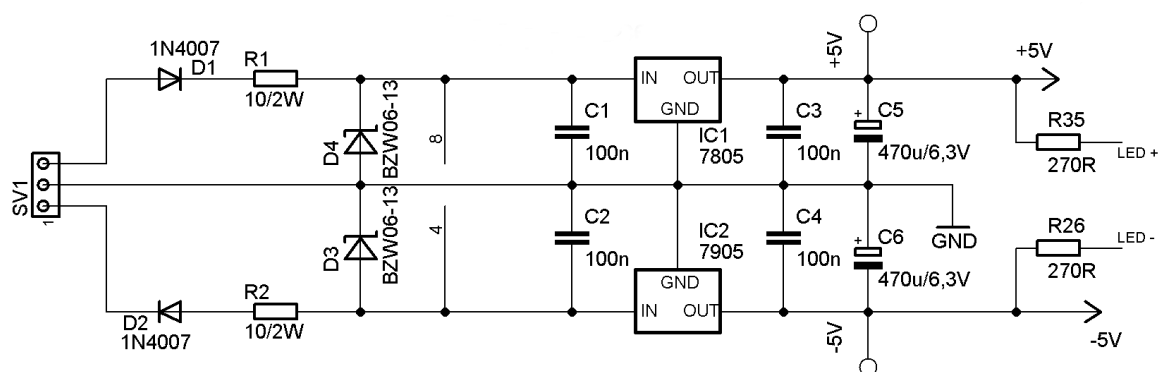
Kde výstupní napětí musí splňovat  $U_O = 5 \text{ V}$  a za předpokladu, že vstupní napětí bude dosahovat  $U_I = 4 \text{ V}$ . Potom je hodnota celkového odporu  $R_{30,34} = 3 \text{ k}\Omega$ , ten se rozdělí na trimr o celkové hodnotě  $R_{30} = 2 \text{ k}\Omega$  a rezistor  $R_{34} = 2 \text{ k}\Omega$ .



Obr. 1.9: Schéma rotujícího posuvného registru a výstupního zesilovače.

### 1.2.6 Napájecí část

Správné napájení je základem každého elektrického zařízení, obzvláště pokud obsahuje citlivé logické obvody. Zmíněné zařízení je napájeno ze stabilizovaného symetrického zdroje  $\pm 12\text{ V}$ . Tohle napětí je ale pro většinu logických obvodů vysoké, proto je sníženo na symetrické napájení  $\pm 5\text{ V}$ . Zapojení zdroje je zcela jednoduché, základ tvoří dva monolitické stabilizátory napětí zapojeny dle katalogových listů[7][8]. Na vstupu zdroje, ještě před stabilizátorem, jsou zcela záměrně umístěny diody, aby při případném přepólování nedošlo k poškození stabilizátorů. Správné připojení polarit a přítomnost napětí indikují LED diody, které jsou umístěny na panelu hned vedle vstupních svorek.



Obr. 1.10: Schéma napájecího zdroje.

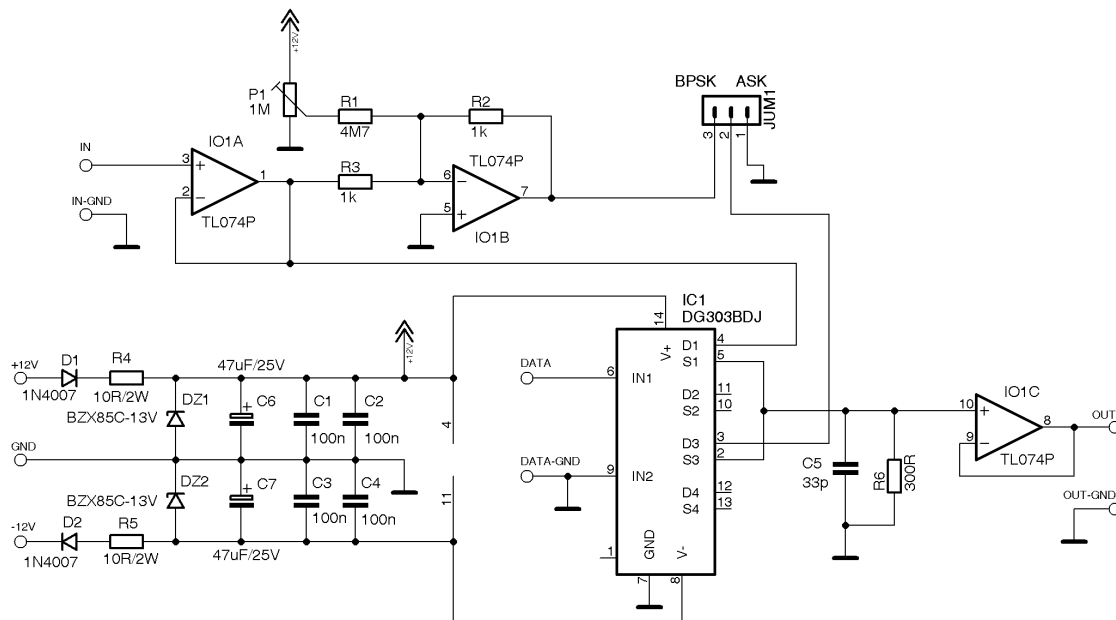
## 1.3 Přípravek pro ASK a BPSK modulaci

Tento laboratorní přípravek umožňuje modulaci ASK i BPSK. Je realizován na jedné DPS, kde se volba modulace provádí pouze změnou polohy jumperu. Hlavním obvodem tohoto přípravku je elektronický přepínač DG303BDJ zapojený katalogového listu[9]. Na jeho vstupy je přiváděn nosný signál a na řídicí vstup je přiváděn digitální modulační neboli klíčovací signál (data), který přepíná mezi dvěma vstupy přepínače. Nosný signál je nejprve přiveden na vstup sledovače, aby nedošlo k přetížení vstupů přepínače. Sledovač je použit i na výstupu přepínače ze stejného důvodu jako na vstupu.

U ASK modulace je nosný signál ze sledovače přiveden na jeden vstup přepínače a druhý vstup přepínače je pomocí jumperu uzemněn. Digitální klíčovací signál přepíná vstupy a výstup nabývá hodnot vstupu 1 (nosný signál) nebo vstupu 2 (zem).

U BPSK modulace je opět nosný signál přiveden přes sledovač na vstup přepínače, ale na druhý vstup je přiváděn invertovaný nosný signál. Výstup tak nabývá hodnot vstupů 1 (nosný signál) nebo vstupu 2 (invertovaný nosný signál).

Přípravek modulátoru je stejně jako generátor nosné a klíčovacího signálu napájen ze symetrického zdroje napětí  $\pm 12\text{ V}$ .



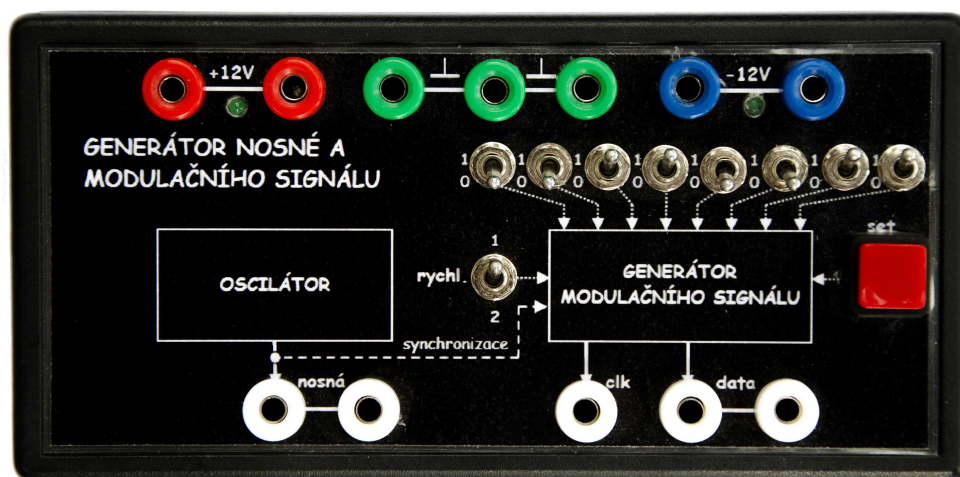
Obr. 1.11: Schéma ASK a BPSK modulátoru



## 2 PRAKTICKÁ ČÁST BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

### 2.1 Konstrukce generátoru

Konstrukce tohoto zařízení je navržena tak, aby s ním bylo možné co nejjednodušeji pracovat a zařízení bylo bytelné z důvodu častého použití při výuce. Základ tvoří dvoudílná krabička z černého plastu o rozměrech 168 x 84 x 36 mm. Uvnitř jsou umístěny dvě desky plošných spojů. Jedna z nich je hlavní, na které se nachází celkové zapojení všech bloků za sebou viz obr. 1.4. Dvacetipinovým konektorem jsou tyto informace předávány druhé desce, na kterou jsou připájeny přepínače a piny pro vstupní a výstupní zdířky. Na panelu v horní části krabičky se nachází napájecí zdířky, u kterých jsou LED diody pro kontrolu přítomnosti napájení. Ve spodní části panelu se nachází zdířky pro výstup: nosného signálu, hodinového signálu a signálu modulačního (data). Pod napájecími zdířkami, vpravo nahoře, se nachází také osm přepínačů, kterými se volí bitová posloupnost. Přepínač sloužící ke změně hodinových pulzů, a tím ke změně bitové rychlosti, a také tlačítko pro potvrzení změny bitových vstupů, je pod bitovými přepínači. Po celém panelu je přilepený zafóliovaný papír s popisky jednotlivých zdířek i ovládacích prvků. Na levé straně krabičky je vyvrtaná díra pro potenciometr, kterým lze doladovat fázový posun, je to tak řešeno z důvodu rychlého doladění průběhu, aniž by se krabička musela rozebírat. Všechny zdířky jsou pro připojení kabelů s banánky o průměru 4 mm.



Obr. 2.1: Pohled na panel generátoru.

### 2.1.1 Oživení hlavních bloků desky

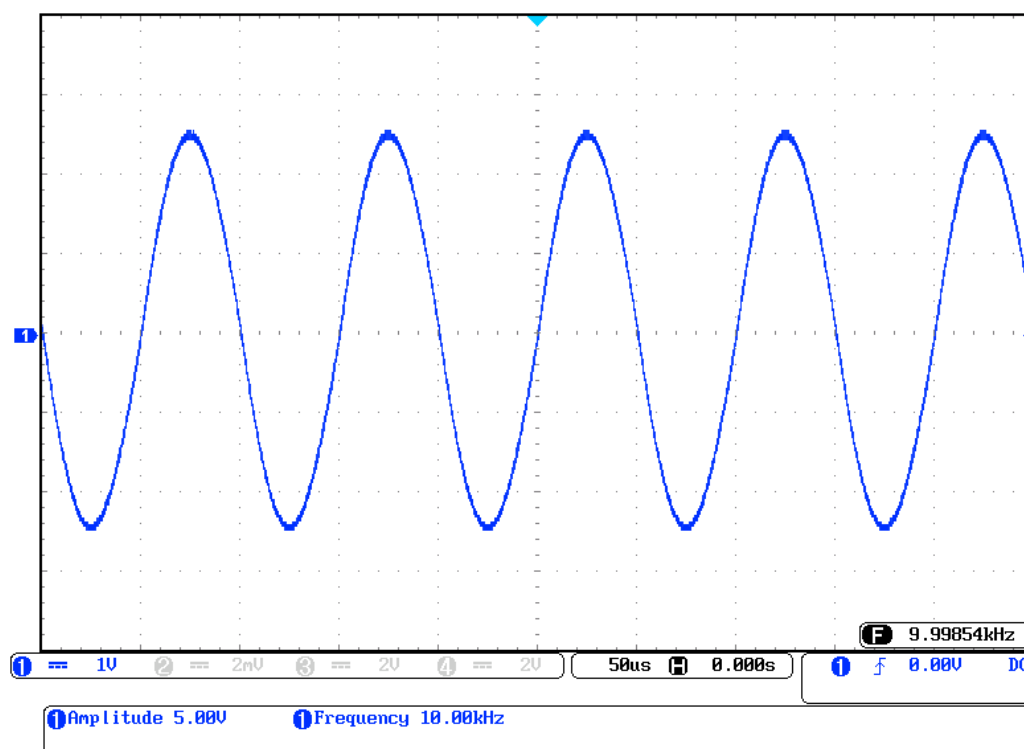
Správné oživení a nastavení zařízení je klíčem k úspěchu. Po zapájení všech součástek do DPS, a připojení všech konektorů, je třeba zařízení správně oživit. Základním krokem je optická kontrola desky, pokud jsou umístěny integrované obvody do patič, je třeba opět všechny opatrně vytáhnout. Je to z důvodu, že se mohla někde vyskytnout chyba a po připojení napájecího napětí může dojít ke zničení těchto součástek, jelikož jsou nejcitlivější z celého zapojení. Pokud je deska bez integrovaných obvodů, následuje nastavení symetrického zdroje. Na zdroji se nastaví příslušné napětí tj.  $\pm 12\text{ V}$ , a pokud zdroj umožňuje proudové omezení, tak se nastaví na minimum. Po propojení symetrického zdroje s přípravkem se musí začít pomalu zvedat proudové omezení, dokud nedojde k jeho vypnutí. Hodnota vstupního proudu by neměla překročit 200 mA.

### 2.1.2 Oživení napájecí části

V této chvíli by měly LED diody u zdířek indikovat přítomnost napájení. Na hlavní DPS jsou vyvedeny měřící body, kde po připojení osciloskopu lze kontrolovat funkci jednotlivých bloků. Nejprve se zkontroluje napětí na stabilizátorech, k tomu slouží piny  $+5\text{ V}$  a  $-5\text{ V}$ . Pokud je napětí v těchto bodech správné, musí se postupně zkontrolovat i na patičích u integrovaných obvodů podle schématu D.1. Pokud jsou všechna napětí správná, po vypnutí zdroje následuje vrácení integrovaných obvodů zpátky do patič. Následuje nastavení a ověřování správné funkce jednotlivých bloků.

### 2.1.3 Nastavení oscilátoru

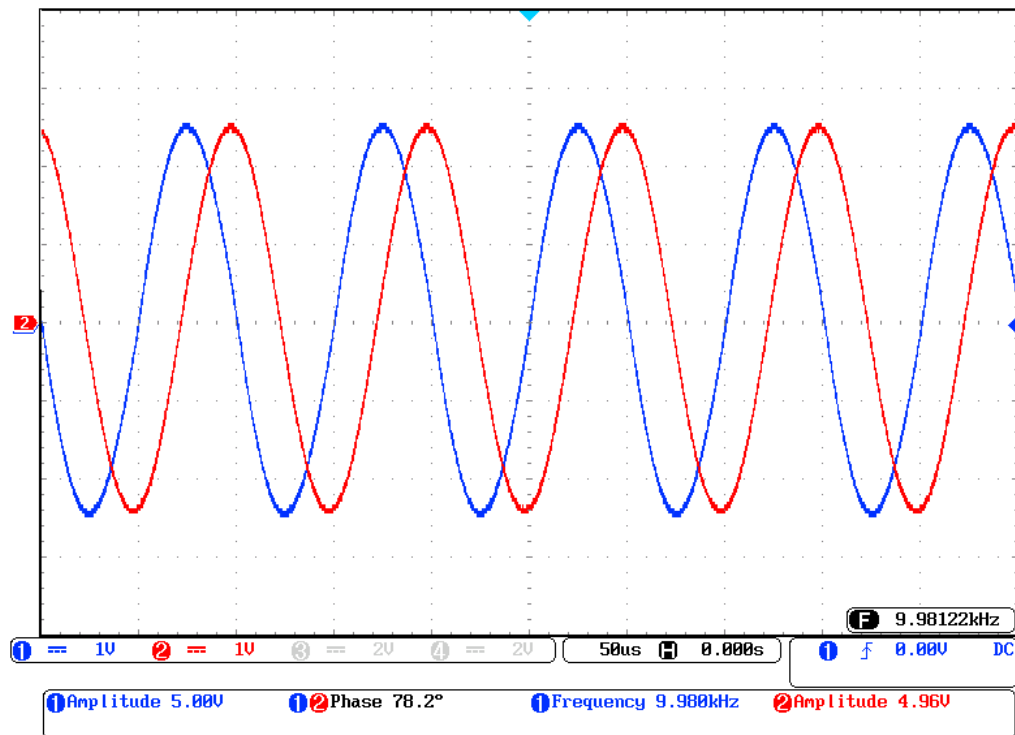
Jako první ze všech bloků se musí začít nastavovat oscilátor. Trimry  $R_3$  a  $R_5$  se nastaví do krajních poloh, při nastavování frekvence je třeba oba nastavovat synchronně tzn. na prvním dvě otáčky, na druhém dvě otáčky. Na osciloskopu připojeném na výstup oscilátoru (pin OSC) se zobrazí harmonický průběh. Trimrem  $R_7$  se nastavuje výstupní amplituda, resp. zesílení. Oscilátor musí být nastaven na hodnoty  $f_{\text{osc}} = 10 \text{ kHz}$  a  $U = 5 \text{ V}$ . Správné nastavení vypadá následovně:



Obr. 2.2: Správně nastavený průběh signálu oscilátoru.

### 2.1.4 Nastavení fázového posunu

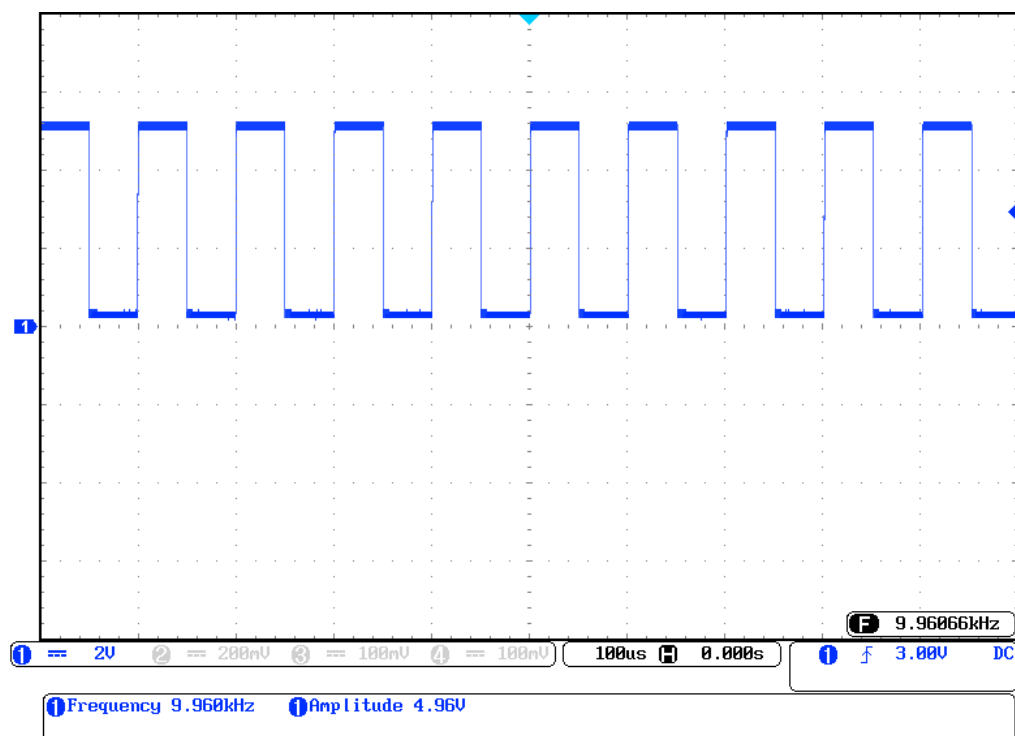
Po správně nastaveném oscilátoru se přejde k nastavení fázového posunu. Na prvním kanálu zůstane zobrazen výstup oscilátoru (pin OSC) a na druhém kanálu bude připojen výstup z fázového posunu (pin OSC\_SHIFT). Potenciometr se nastaví tak, aby byl posun fáze o  $90^\circ$  a trimrem  $R_{29}$  výstupní amplituda  $U = 5\text{ V}$  jako na obrázku:



Obr. 2.3: Správně nastavený fázový posun.

### 2.1.5 Nastavení komparátoru s nulovou úrovní

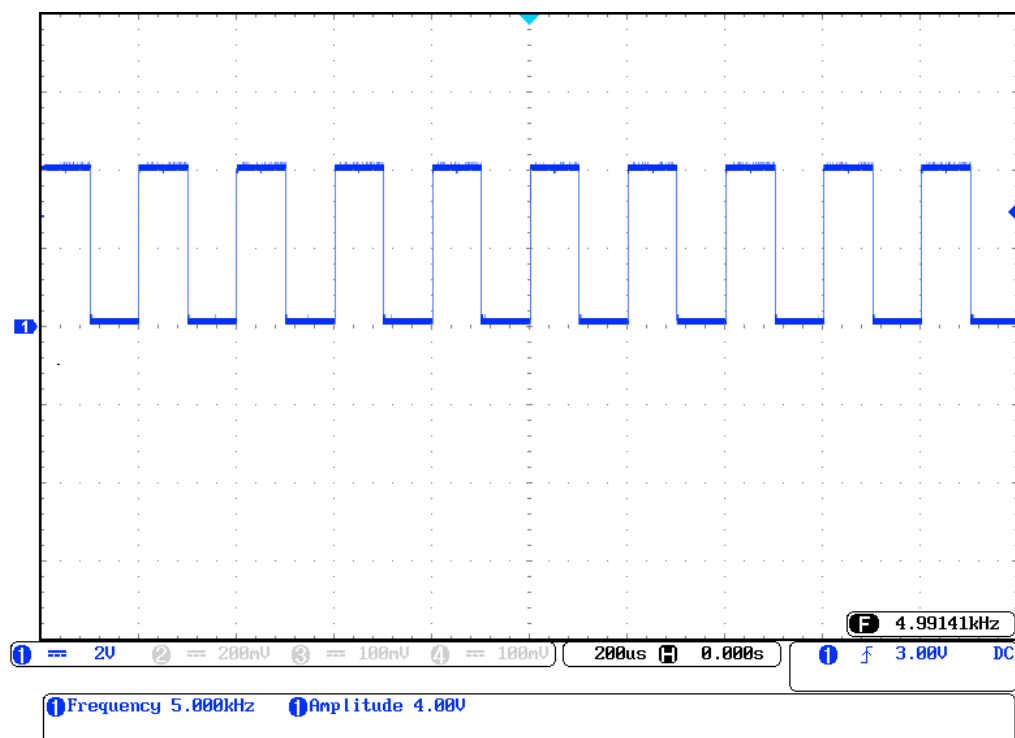
U tohoto bloku se nastaví vstupní offset pomocí trimru  $R_{11}$ . Pro tohle nastavení se zobrazí výstup z komparátoru na osciloskopu (pin CLK1). Na osciloskopu je třeba nastavit DC analýzu u daného kanálu a zvětšit si zobrazení signálu u log.0. Trimr  $R_{11}$  se nastaví tak, aby byl výsledný signál co nejblíže k virtuální nule kanálu osciloskopu.



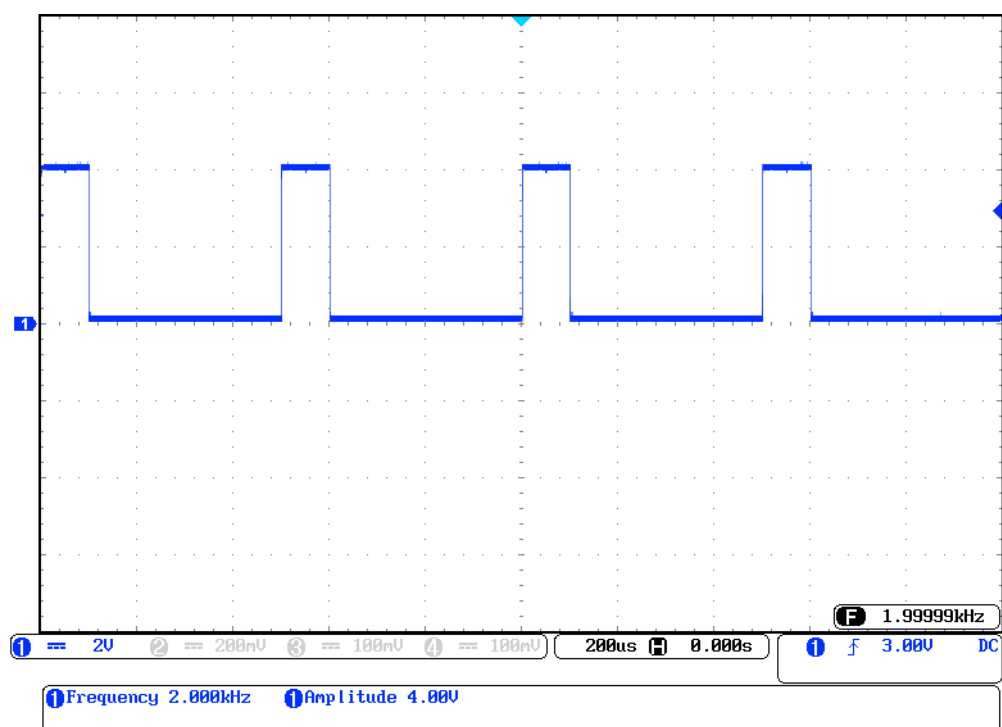
Obr. 2.4: Výstupní průběh z komparátoru.

### 2.1.6 Nastavení děličky kmitočtu

U děličky kmitočtu není třeba nic nastavovat, stačí jen zkontrolovat, zda funguje přepínání rychlostí. První kanál osciloskopu se připojí na výstup z děličky (pin CLK2), tím bude zobrazen výstupní obdélníkový signál. Ten při dělení kmitočtu dvěma má mít frekvenci 5 kHz se střídou 50 %. Při dělení pěti má být frekvence 2 kHz a střída signálu 20 %. Na následujících obrázcích jsou tyto průběhy zobrazeny.



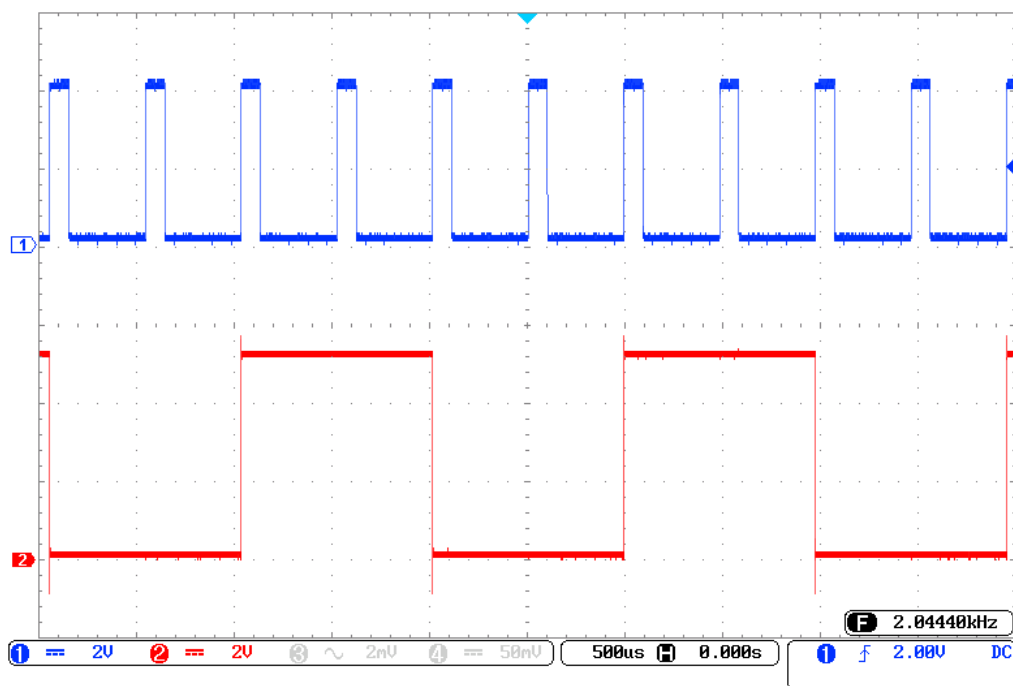
Obr. 2.5: Dělení kmitočtu dvěma.



Obr. 2.6: Dělení kmitočtu pěti.

### 2.1.7 Nastavení bitové posloupnosti

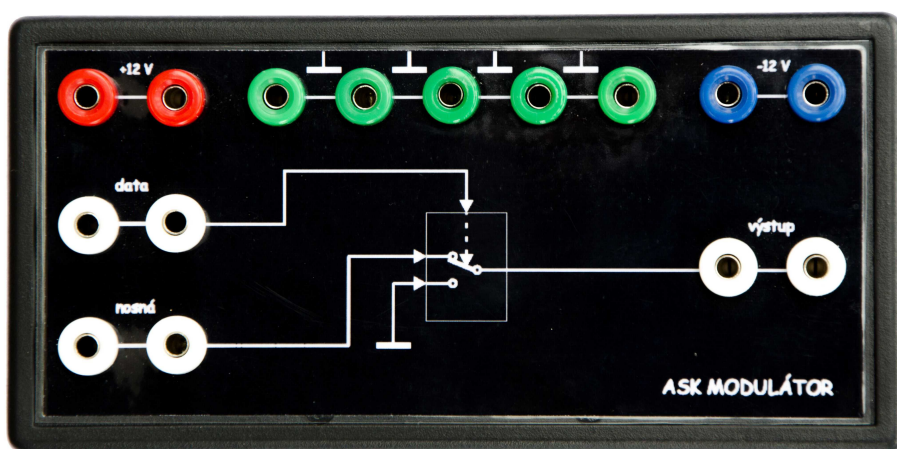
U tohoto posledního bloku stačí jen ověřit správnou funkci všech přepínačů, jimiž se volí bitová posloupnost. Osciloskop se připojí na výstup (pin DATA). Po přepnutí každého bitu se musí potvrdit tlačítkem SET, aby došlo ke změně na výstupu. Pokud maximum amplitudy průběhu není 5 V, trimrem  $R_{30}$  se dá hodnota doladit. Průběhy CLK1 – modrý a DATA – červený. Průběh je zobrazen při dělení pěti.



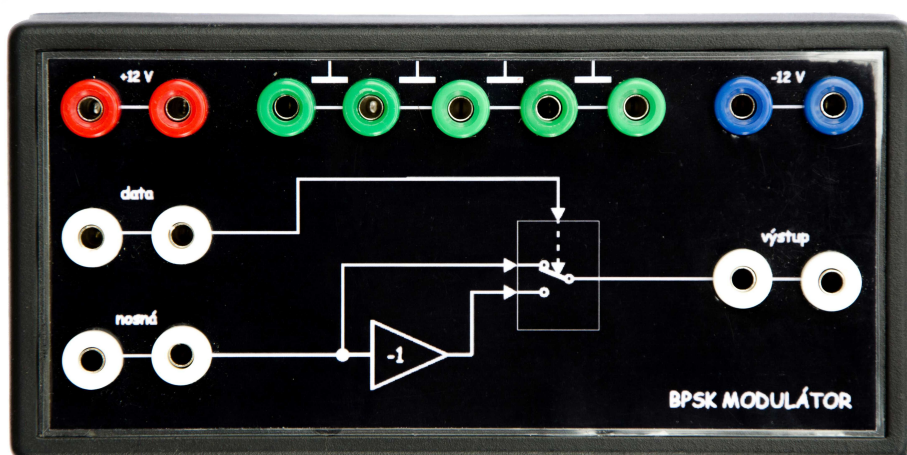
Obr. 2.7: Zvolená kombinace bitů 00110011.

## 2.2 Konstrukce modulátoru

Konstrukce je navržena tak, aby zařízení bylo bytelné z důvodu častého použití při výuce. Základ tvoří dvoudílná krabička z černého plastu o rozměrech 168 x 84 x 36 mm. Uvnitř je umístěna DPS na distančních sloupcích. Na panelu v horní části krabičky se nachází napájecí zdířky. Po krajních částech panelu jsou zdířky pro vstup: nosného signálu a signálu modulačního (data) a také pro výstup modulovaného signálu. Po celém panelu je přilepený zafóliovaný papír s popisky jednotlivých zdířek a jednoduchým schématem funkce. Všechny zdířky jsou pro připojení kabelů s banánky o průměru 4 mm.



Obr. 2.8: Pohled na panel ASK modulátoru.



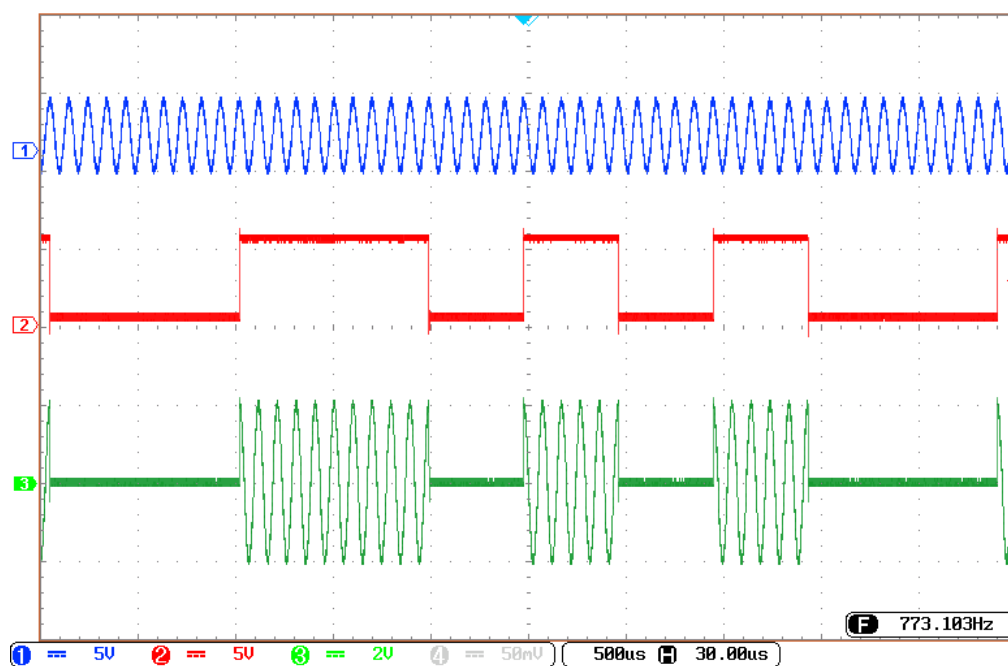
Obr. 2.9: Pohled na panel BPSK modulátoru.



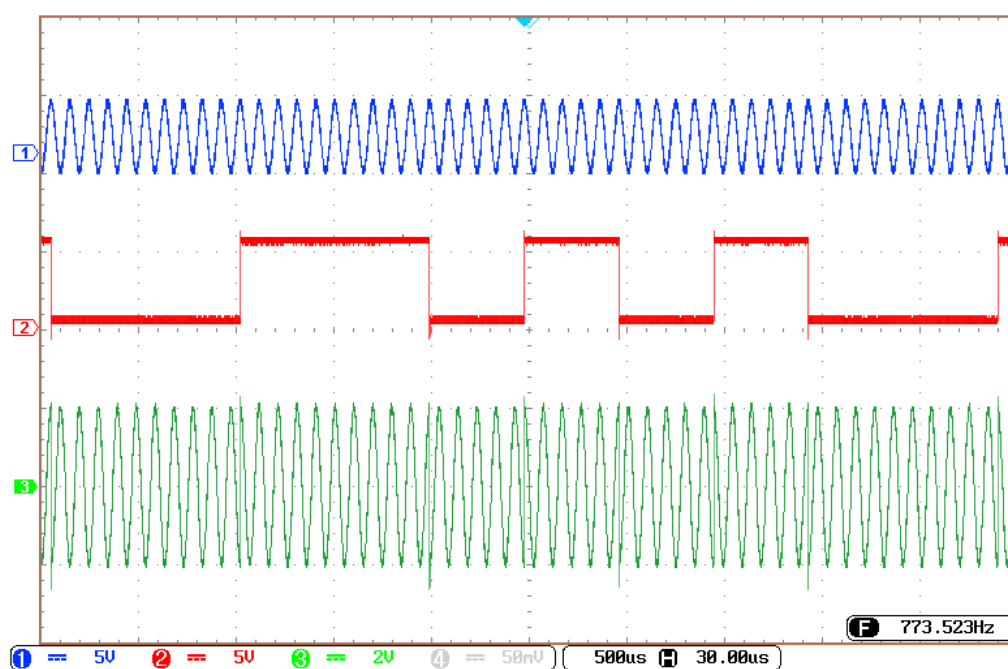
## 2.3 Ověření funkčnosti při ASK a BPSK modulaci

Zde je uveden postup, jak zapojit generátor nosné a modulačního signálu s ASK nebo BPSK modulátorem a následným zobrazením průběhu na osciloskopu. Pro oba modulátory je postup stejný. Nejprve se připojí napájení ze symetrického zdroje  $\pm 12\text{ V}$  na napájecí zdířky generátoru a zároveň na napájecí zdířky modulátoru. Před zapnutím zdroje se přesvědčíme o správném zapojení polarit kabelů. Po zapnutí zdroje by měly na generátoru svítit LED diody signalizující napájení. První kanál osciloskopu bude připojen na zdířku nosná a musí se připojit i zem. Na osciloskopu by se měl zobrazit harmonický průběh s frekvencí  $10\text{ kHz}$  a amplitudou  $5\text{ V}$ . Na dalším vstupu osciloskopu bude generování modulačního signálu a na přepínačích bitové posloupnosti se nastaví například kombinace  $11001001$  a potvrdí se červeným tlačítkem SET. Je vhodné používat funkci SINGLE na osciloskopu, jelikož se špatně zobrazuje celá perioda tj. 8 bitů datového signálu. Na osciloskopu by se měl zobrazit průběh dané kombinace bitů. Pokud se tak nestane, je třeba stisknout červené tlačítko SET znova.

Tímto je ověřena správnost generování signálů a propojíme datový a nosný signál modulátorem. Samozřejmě se musí připojit i napájecí napětí k modulátoru. Výstup modulátoru se připojí na další kanál osciloskopu a po stisku funkce SINGLE by se měl zobrazit modulovaný signál dle použitého modulátoru. Je možné, že bude posunuta fáze nosného signálu oproti modulačnímu signálu, to lze doladit pomocí šroubováku z levé strany na generátoru tak, aby se výsledek podobal následujícím obrázkům:



Obr. 2.10: První kanál zobrazuje signál nosný s frekvencí 10 kHz, druhý kanál modulační signál 00110101, a na třetím kanálu je modulovaný signál ASK.



Obr. 2.11: První kanál zobrazuje signál nosný s frekvencí 10 kHz, druhý kanál modulační signál 00110101, a na třetím kanálu je modulovaný signál BPSK.

## 2.4 Laboratorní úloha

Poslední součástí zadání bylo vytvořit laboratorní úlohu na téma „Základní klíčovací techniky“ do předmětu teorie sdělování. Cílem úlohy je seznámit studenty se základními klíčovacími technikami v praxi, kde si ověří a změří parametry ASK, FSK a BPSK modulací. Teorie, podrobný postup, vypracování a vzorové řešení laboratorní úlohy se nachází v příloze této práce.

### 3 ZÁVĚR

Cílem této bakalářské práce bylo zkonstruovat sadu přípravků pro ukázkou základních metod klíčování. Hlavní přípravek slouží pro generování harmonického nosného a obdélníkového modulačního signálu s volitelnou 8bitovou posloupností. A k němu sestrojil ASK a BPSK modulátory. Základem bylo ujasnit si, k čemu vlastně budou tyto přípravky v praxi využity. Z toho důvodu je ze začátku vysvětlen základní princip modulace a základní techniky digitální modulací. V teoretické části proběhl návrh jednotlivých bloků generátoru a modulátoru. U modulátoru bylo požadováno, aby se oba modulátory nacházely na jedné DPS, kde se ušetřilo návrhu dvou různých desek. Také bylo třeba vypočítat určité hodnoty součástek, aby výsledné parametry odpovídaly zadání.

V praktické části proběhlo vyrobení DPS a samotná konstrukce přípravků. Dle pokynů vedoucího práce byl brán zřetel na zpracovanost a robustnost přípravků z důvodu častého používání ve výuce. Také musel být zohledněn fakt, aby bylo zařízení přehledné a jednoduché k obsluze a zároveň, aby byl jednoduchý servis v doladění průběhů nebo zničených obvodů. Proto byly také v zapojení zvoleny trimry namísto pevných rezistorů a desky jsou umístěny tak, aby k nim byl po sejmutí víka snadný přístup. Generátor umožňuje dodatečné doladění fázového posunu i bez rozebrání, aby bylo možné nastavení fáze dané digitální modulace. Dále byly popsány podrobné postupy, jak jednotlivé bloky oživit a tak celou sestavu zařízení uvést do provozu.

Posledním úkolem bylo vypracovat laboratorní úlohu na téma „Základní klíčovací techniky“, která zahrnuje teorii a postup měření, podle kterého lze tato laboratorní úloha jednoduše změřit. Další část obsahuje výsledné měření, které bude sloužit výhradně pro vyučující, kteří podle této předlohy budou kontrolovat správnost naměřených výsledků.

## LITERATURA

- [1] ČÍŽ, R. *Teorie sdělování* [online]. poslední aktualizace 8.12.2015 [cit. 2015.12.09]. Dostupné z URL: <<http://www.utko.feec.vutbr.cz/~cizr/tsd/index.php>>.
- [2] PUNČOCHÁŘ, J. *Operační zesilovače v elektronice*. 5. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2002, 484 s. ISBN 80-730-0059-8. [cit. 2015.12.09].
- [3] RONEŠOVÁ, A. *Oscilátor s Wienovým článkem* [online]. [cit. 2015.12.09]. Dostupné z URL: <[http://home.zcu.cz/~ronesova/index.php?menuitem=aes\\_mwg](http://home.zcu.cz/~ronesova/index.php?menuitem=aes_mwg)>.
- [4] Texas Instruments *LM311N* [online]. 2015. [cit. 2015.12.09]. Dostupné z URL: <<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm311.pdf>>.
- [5] Lattice Semiconductor *GAL16V8* [online]. 2015. [cit. 2015.12.09]. Dostupné z URL: <<http://www.latticesemi.com>>.
- [6] Lattice Semiconductor *GAL22V10* [online]. 2015. [cit. 2015.12.09]. Dostupné z URL: <<http://www.latticesemi.com>>.
- [7] Fairchild Semiconductor *LM7805* [online]. 2015. [cit. 2015.12.09]. Dostupné z URL: <<https://www.fairchildsemi.com/datasheets/LM/LM7805.pdf>>.
- [8] Fairchild Semiconductor *LM7905* [online]. 2015. [cit. 2015.12.09]. Dostupné z URL: <<https://www.fairchildsemi.com/datasheets/LM/LM7905.pdf>>.
- [9] Vishay *DG303BDJ* [online]. 2016. [cit. 2016.5.10]. Dostupné z URL: <<http://www.vishay.com/docs/71402/71402.pdf>>.

## SEZNAM ZKRATEK

AM	Amplitudová modulace – Amplitude Modulation
FM	Frekvenční modulace – Frequency Modulation
DVB	Digitální televizní vysílání – Digital Video Broadcast
GSM	Globální systém pro mobilní komunikaci – Global System for Mobile communication
Wi-Fi	Soubor standardů pro bezdrátovou komunikaci v počítačových sítích
ASK	Amplitudové klíčování – Amplitude Shift Keying
FSK	Frekvenční klíčování – Frequency Shift Keying
PSK	Fázové klíčování – Phase Shift Keying
LED	Dioda emitující světlo – Light Emitting Diode
BFSK	Dvoustavové frekvenční klíčování – Binary Frequency Shift Keying
BPSK	Dvoustavové fázové klíčování – Binary Phase Shift Keying
QPSK	Čtyřstavové fázové klíčování – Quadrature Phase Shift Keying
8PSK	Osmistavové fázové klíčování – 8 Phase Shift Keying
16PSK	Šestnáctistavové fázové klíčování – 16 Phase Shift Keying
PLD	Programovatelný logický obvod – Programmable Logic Device
MSB	Nejvíce významný bit – Most Significant Bit
LSB	Nejméně významný bit – Least Significant Bit
DPS	Deska plošných spojů
NRZ	Bez návratu k nulové úrovni – Non Return to Zero

# SEZNAM PŘÍLOH

A	Zadání laboratorní úlohy	40
B	Protokol o měření	47
C	Vzorové vypracování	52
D	Schémata	55
E	Osazovací plány	58
F	Desky plošných spojů	60
G	Potisky panelů	62
H	Rozpiska součástek generátoru	65
I	Rozpiska součástek ASK a BPSK modulátoru	67
J	Obsah přiloženého CD	68

# A ZADÁNÍ LABORATORNÍ ÚLOHY

## Základní klíčovací techniky

---

*Jména a Příjmení:*

*Datum:*

*Studijní obor:*

*Ročník:*

---

### Cíl úlohy

Seznámení s principy základních klíčovacích technik ASK, FSK a BPSK a změření základních parametrů příslušných signálů.

### Seznam přístrojů a pomůcek

1. funkční generátor Agilent 33120A/33220A
2. osciloskop Tektronix TDS 2002
3. generátor nosné a klíčovacího signálu
4. ASK modulátor a BPSK modulátor
5. propojovací kabely

### Teoretický úvod

Tato laboratorní úloha se zabývá základními technikami digitálních modulací, taktéž nazývanými klíčování z angl. Keying. Klíčování je nelineární proces, kterým se mění charakter vhodného nosného signálu pomocí klíčovacího signálu. Nosný signál je ten, který se moduluje (klíčuje) klíčovacím signálem a zpravidla má vyšší frekvenci než signál klíčovací. Klíčovacím signálem jsou data, která se mají namodulovat na nosný signál. Zařízení, které umožňuje provádět modulaci (klíčování) se nazývá modulátor, vyskytuje se nejčastěji ve vysílačích, aby bylo možné z modulovaného signálu dostat potřebné informace, musíme modulovaný signál demodulovat. O tuto funkci se stará demodulátor na straně přijímače.



## Amplitudové klíčování (ASK - Amplitude Shift Keying):

Amplitudové klíčování lze popsat rovnicí:

$$s_{\text{ASK}}(t) = s_c(t) \times g(t), \quad (\text{A.1})$$

kde

$$s_c(t) = S_c \cos(\omega_c t) \quad (\text{A.2})$$

je harmonická nosná vlna a

$$g(t) = 0, \quad (\text{A.3})$$

$$g(t) = 1, \quad (\text{A.4})$$

je obdélníkový klíčovací signál (unipolární NRZ).

Jestliže modulační signál  $g(t)$  přenáší periodickou posloupnost 010101..., lze jej vyjádřit Fourierovou řadou:

$$g(t) = 0,5 + \sum_{k=1}^{\infty} S_k \cos(kt\Omega), \quad (\text{A.5})$$

kde

$$S_k = \text{sinc}(k\frac{\pi}{2}) \quad (\text{A.6})$$

Po dosazení do rovnice pro amplitudově klíčovaný signál  $s_{\text{ASK}}(t)$  dostaneme:

$$s_{\text{ASK}}(t) = S_c \cos(\omega_c t) \times [0,5 + \sum_{k=1}^{\infty} \text{sinc}(k\frac{\pi}{2}) \times \cos(kt\Omega)] = \quad (\text{A.7})$$

$$\frac{S_c}{2} \cos(\omega_c t) + \frac{S_c}{2} \sum_{k=1}^{\infty} \text{sinc}(k\frac{\pi}{2}) \times \cos[(\omega_c t + k\Omega)t] + \frac{S_c}{2} \sum_{k=1}^{\infty} \text{sinc}(k\frac{\pi}{2}) \times \cos[(\omega_c t - k\Omega)t]$$

---

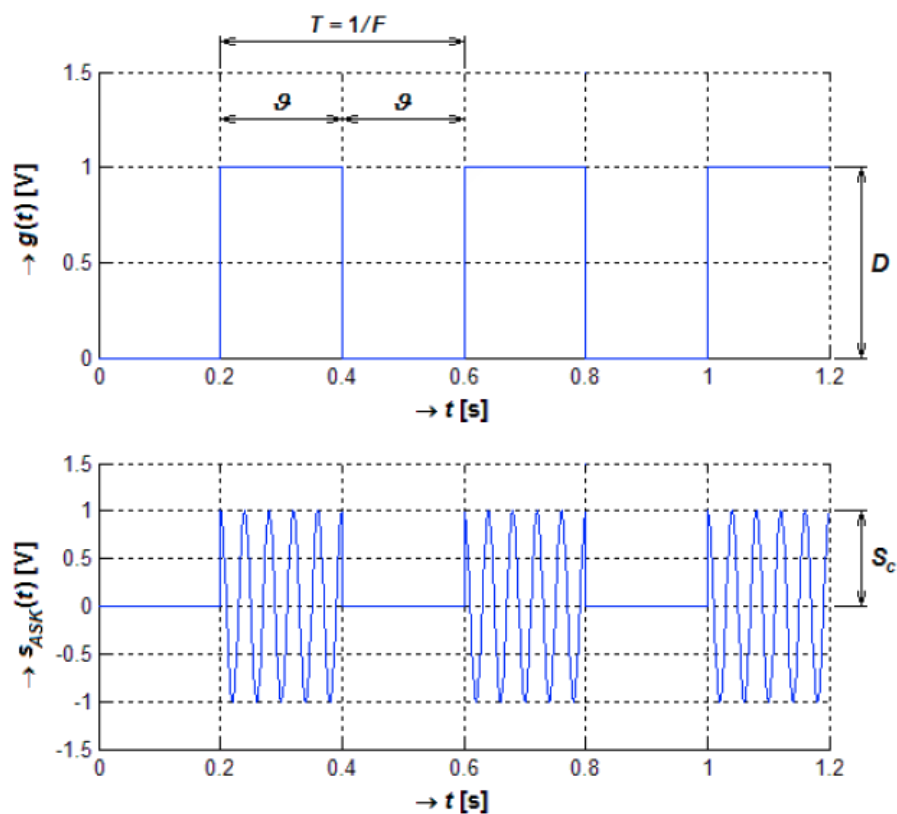
**nosná složka**

**horní postranní pásmo**

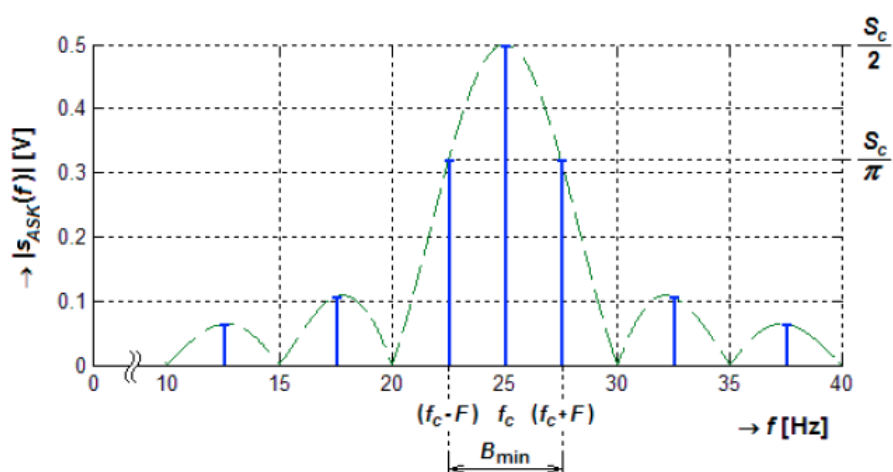
**dolní postranní pásmo**

Sudé postranní složky jsou nulové, minimální potřebná šířka pásma:

$$B_{\min} = 2F = M \quad (\text{A.8})$$



Obr. A.1: Modulační a ASK modulovaný signál.[1]



Obr. A.2: Spektrum ASK modulace.[1]

## Dvoustavové fázové klíčování (BPSK - Binary Phase Shift Keying):

Dvoustavové fázové klíčování lze popsat rovnicí:

$$s_{\text{BPSK}}(t) = s_c(t) \times g(t), \quad (\text{A.9})$$

kde

$$s_c(t) = S_c \cos(\omega_c t) \quad (\text{A.10})$$

je harmonická nosná vlna a

$$g(t) = 1, \quad (\text{A.11})$$

$$g(t) = -1, \quad (\text{A.12})$$

je obdélníkový klíčovací signál (bipolární NRZ).

Jestliže modulační signál  $g(t)$  přenáší periodickou posloupnost 010101..., lze jej vyjádřit Fourierovou řadou:

$$g(t) = \sum_{k=1}^{\infty} S_k \cos(kt\Omega), \quad (\text{A.13})$$

kde

$$S_k = 2 \times \text{sinc}\left(k\frac{\pi}{2}\right) \quad (\text{A.14})$$

Po dosazení do vztahu  $s_{\text{BPSK}}(t)$  dostaneme:

$$s_{\text{BPSK}}(t) = S_c \cos(\omega_c t) \times \left[ 2 \times \sum_{k=1}^{\infty} \text{sinc}\left(k\frac{\pi}{2}\right) \times \cos(kt\Omega) \right] = \quad (\text{A.15})$$

$$S_c \sum_{k=1}^{\infty} \text{sinc}\left(k\frac{\pi}{2}\right) \times \cos[(\omega_c t + k\Omega)t] + S_c \sum_{k=1}^{\infty} \text{sinc}\left(k\frac{\pi}{2}\right) \times \cos[(\omega_c t - k\Omega)t]$$

---

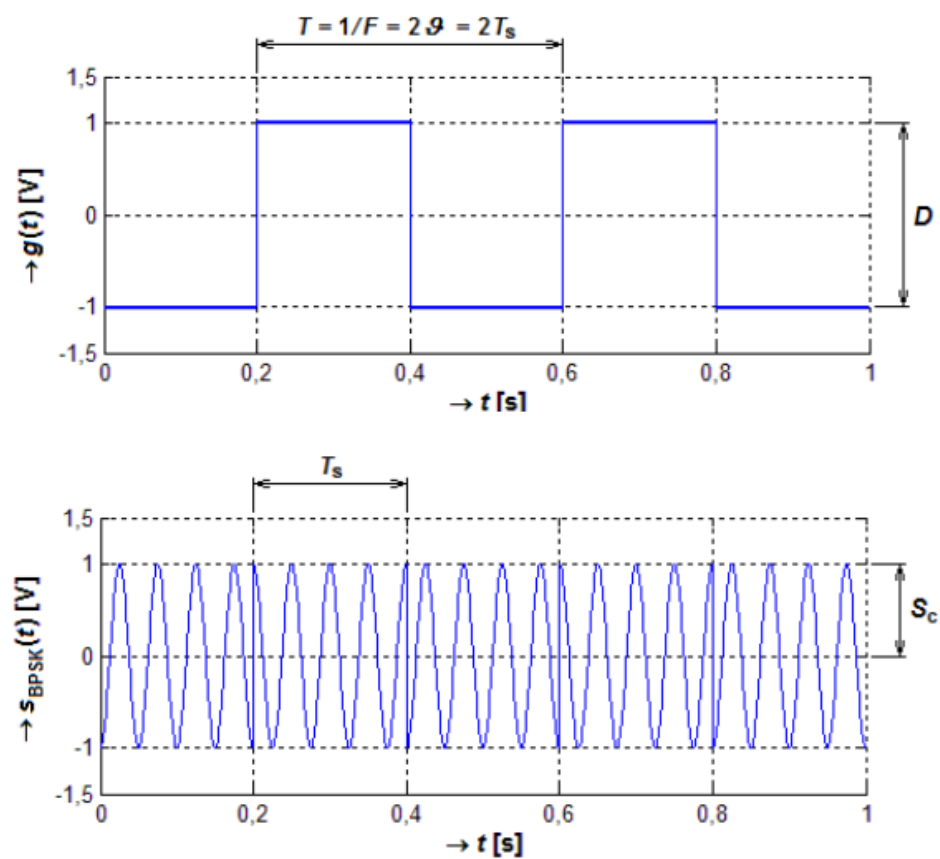
**horní postranní pásmo**

---

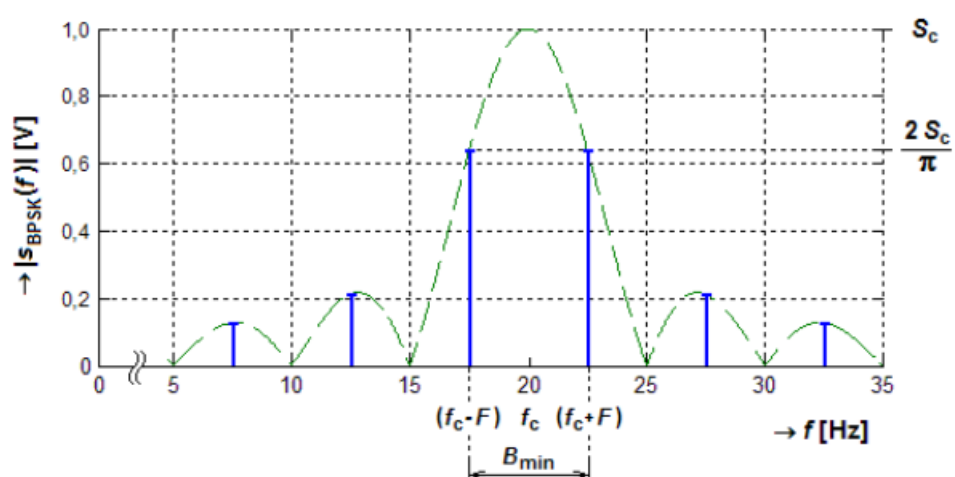
**dolní postranní pásmo**

Minimální šířka pásma kanálu:

$$B_{\min} = 2F = M \quad (\text{A.16})$$



Obr. A.3: Modulační a BPSK modulovaný signál.[1]



Obr. A.4: Spektrum BPSK modulace.[1]

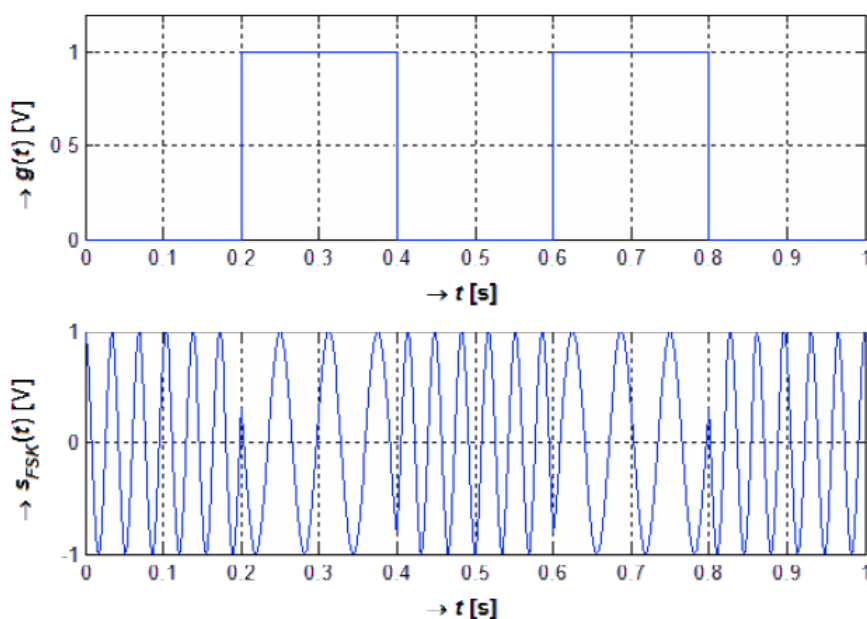
## Kmitočtové klíčování (FSK - Frequency Shift Keying):

Při kmitočtovém klíčování jsou binární symboly 1 a 0 vyjádřeny harmonickým signálem s kmitočtem  $f_1$  a  $f_0$ . Změny kmitočtu mohou probíhat:

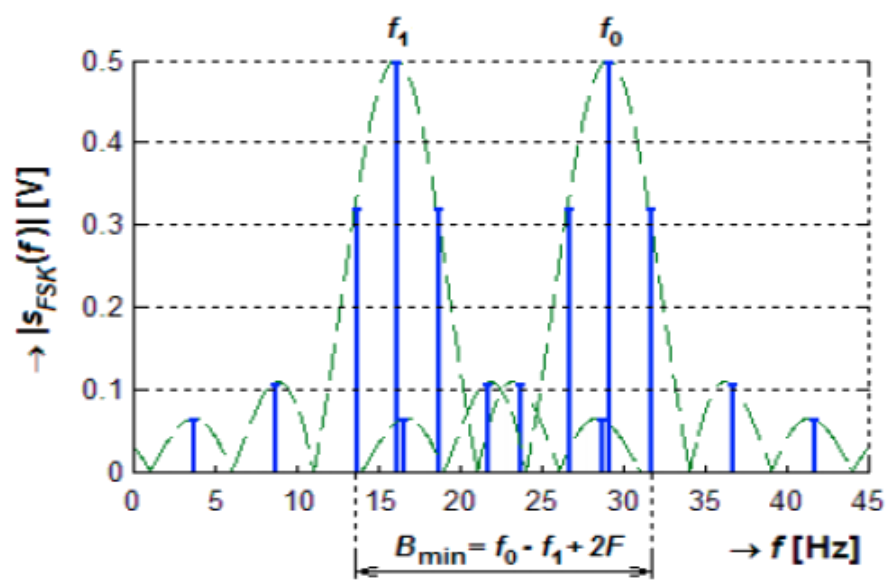
- a) **nespojité** - přepínáním výstupů nezávislých oscilátorů s kmitočty  $f_1$  a  $f_0$ , fáze se při tom mění skokem.
- b) **spojité** - přepínáním kmitočtu jednoho oscilátoru nenastává skoková změna fáze, což se příznivě projeví na jeho amplitudovém spektru.

V této úloze se bude měřit spojitý FSK, protože oba kmitočty generuje jeden generátor, který je synchronní, proto lze výsledný průběh vyjádřit součtem dvou samostatných průběhů odpovídajících signálům s amplitudovým klíčováním s nosnými kmitočty  $f_1$  a  $f_0$ . Výsledné spektrum bude dáno součtem dvou dílčích spekter ASK signálů. Minimální potřebná šířka pásma je:

$$B_{min} = f_0 - f_1 + 2F = f_0 - f_1 + M \quad (\text{A.17})$$



Obr. A.5: Modulační a FSK modulovaný signál.[1]



Obr. A.6: Spektrum FSK modulace.[1]

## B PROTOKOL O MĚŘENÍ

*Jména a Příjmení:*

*Datum:*

*Studijní obor:*

*Ročník:*

---

### Zadání

1. Změřte základní parametry generátoru nosné a klíčovacího signálu.
2. U ASK modulace změřte časový průběh a amplitudové spektrum, určete minimální potřebnou šířku pásma kanálu pro přenos tohoto signálu.
3. U BPSK modulace změřte časový průběh a amplitudové spektrum, určete minimální potřebnou šířku pásma kanálu pro přenos tohoto signálu.
4. Pomocí funkčního generátoru vytvořte FSK signál, změřte jeho časový průběh a amplitudové spektrum, určete minimální potřebnou šířku pásma kanálu pro přenos tohoto signálu.

### Postup měření

Při připojování a přepojování napájecích kabelů musí být zdroj napájení vypnutý!

1. a) Přípravek generátor nosné a klíčovacího signálu připojte ke stabilizovanému zdroji napětí  $\pm 12\text{ V}$ , a po kontrole zapojení kabelů můžete zapnout napájecí zdroj. Pokud je generátor správně zapojený, svítí u jeho napájecích svorek zelené LED diody.  
b) Pomocí osciloskopu změřte na svorce nosná kmitočty  $f_0$  nosného signálu a zaznamenejte ji do protokolu z měření. (Aby byl signál správně zobrazen musí mít vždy osciloskop připojenou zem u přípravku).  
c) Po změření kmitočtu nosného signálu zvolte pomocí přepínačů 8bitovou periodicky se opakující posloupnost 01010101 a libovolnou bitovou rychlost. Po stisknutí červeného tlačítka SET na generátoru zkontrolujte pomocí osciloskopu generování dat. Pro správné zobrazení generovaných dat je vhodné na osciloskopu použít funkci AUTOSET a poté funkci SINGLE. Nezapomeňte přitom, že po každé změně na generátoru je třeba znova aktivovat funkci SINGLE.  
d) Změřte a zaznamenejte do protokolu hodnoty obou bitových rychlostí  $R_1$  a  $R_2$ , které zvolíte přepínačem rychlosti.

## 2. ASK:

- a) ASK modulátor připojte ke stabilizovanému zdroji napětí  $\pm 12\text{ V}$  a propojte nosný a datový signál mezi přípravky.
- b) První kanál osciloskopu připojte na svorku data u modulátoru a druhý kanál osciloskopu připojte na výstup modulátoru.
- c) Na generátoru nastavte rychlost 1 a posloupnost dat 10101010 a potvrďte červeným tlačítkem SET. Po použití funkce AUTOSET a SINGLE by se na osciloskopu měly zobrazit dva časové průběhy. První průběh odpovídá zvoleným datům a druhý průběh je ASK signál.
- d) Zakreslete do protokolu časový průběh ASK modulace.
- e) Zobrazte amplitudové spektrum pomocí funkce FFT. Změřený kmitočet nosné nastavte pomocí horizontálního posuvu na střed stínítka osciloskopu, tím bude amplitudové spektrum zobrazeno symetricky. Takto nastavené amplitudové spektrum zaznamenejte.
- f) Pomocí kurzorů změřte minimální šířku pásma  $B_{min}$ .
- g) Po měření vypněte napájecí zdroj a přejděte k dalšímu bodu měření.

## 3. BPSK:

- a) Místo ASK modulátoru připojte BPSK modulátor. Po kontrole zapojení kabelů zapněte napájecí zdroj.
- b) Proces nastavení pro měření je shodný s měřením ASK: b) - f).
- c) Po měření vypněte napájecí zdroj, rozpojte všechny přípravky a přejděte k dalšímu bodu měření.

## 4. FSK:

- a) Na funkčním generátoru nejprve nastavte parametry harmonického signálu, kterým bude vyjádřena logická 0 (amplituda  $S = 1\text{ V}$ , kmitočet  $f_0 = 30\text{ kHz}$ ).
- b) Stiskněte tlačítko MOD a funkčním tlačítkem TYPE vyberte modulaci FSK.
- c) Funkčním tlačítkem Hop Freq nastavte kmitočet harmonického signálu logické 1 na  $f_1 = 10\text{ kHz}$ .
- d) Obdobně nastavte kmitočet modulačního signálu FSK Rate na  $F = 2\text{ kHz}$ .
- e) Propojte výstup funkčního generátoru se vstupem osciloskopu pomocí BNC kabelu.
- f) Zaznamenejte časový průběh a amplitudové spektrum FSK modulace a pomocí kurzorů změřte minimální šířku pásma  $B_{min}$ .



# Vypracování

## 1: Základní parametry:

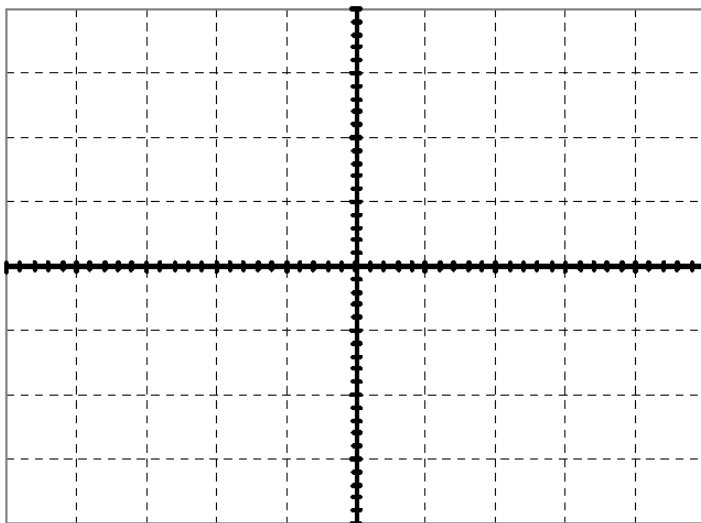
$$f_0 =$$

$$R_1 =$$

$$R_2 =$$

## 2: ASK

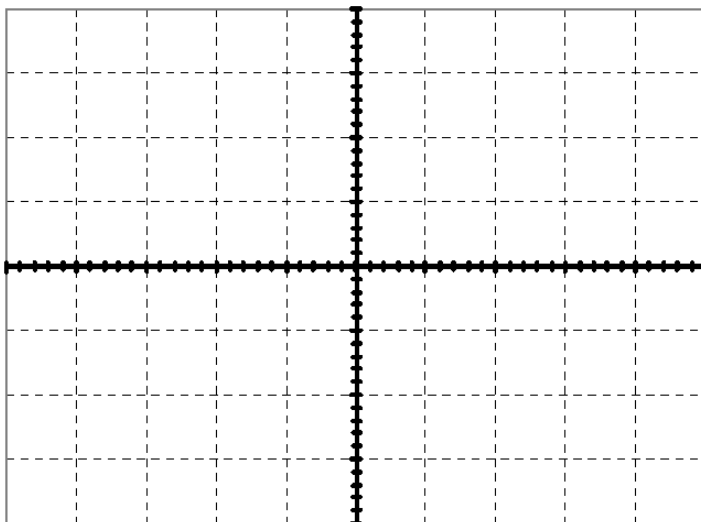
Časový průběh



Vertikální rozlišení:

Horizontální rozlišení:

Amplitudové spektrum



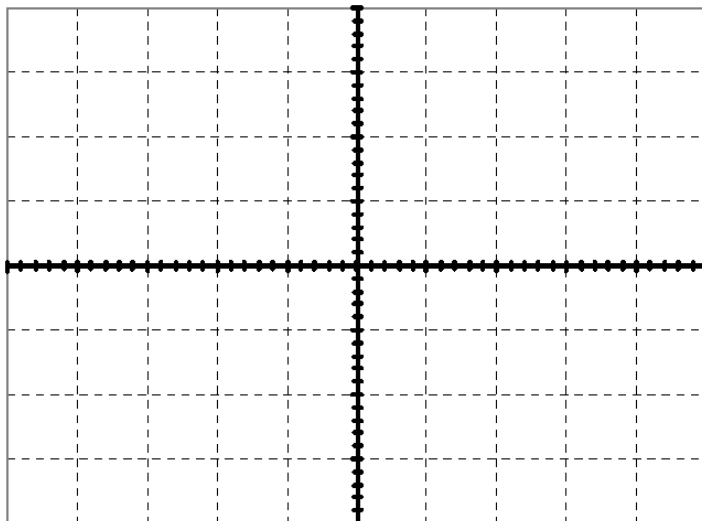
Vertikální rozlišení:

Horizontální rozlišení:

$$B_{min} =$$

### 3: BPSK

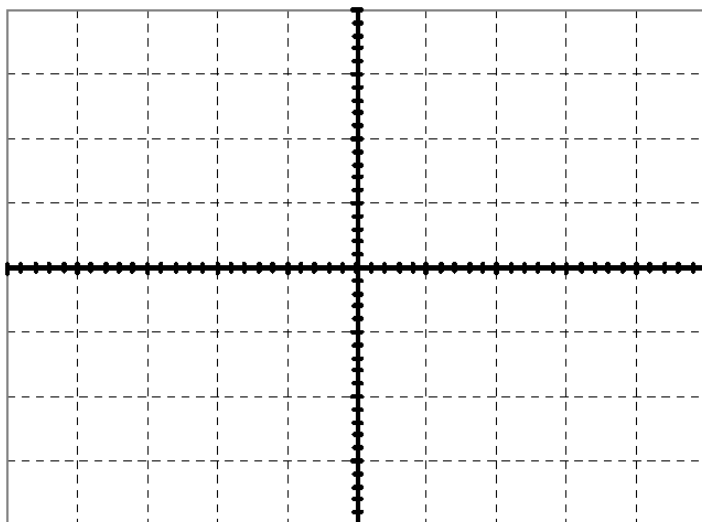
Časový průběh



Vertikální rozlišení:

Horizontální rozlišení:

Amplitudové spektrum



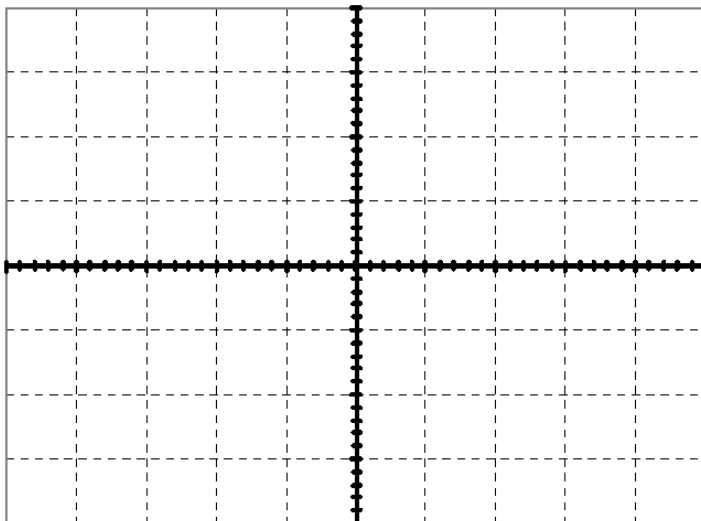
Vertikální rozlišení:

Horizontální rozlišení:

$B_{min} =$

#### 4: FSK

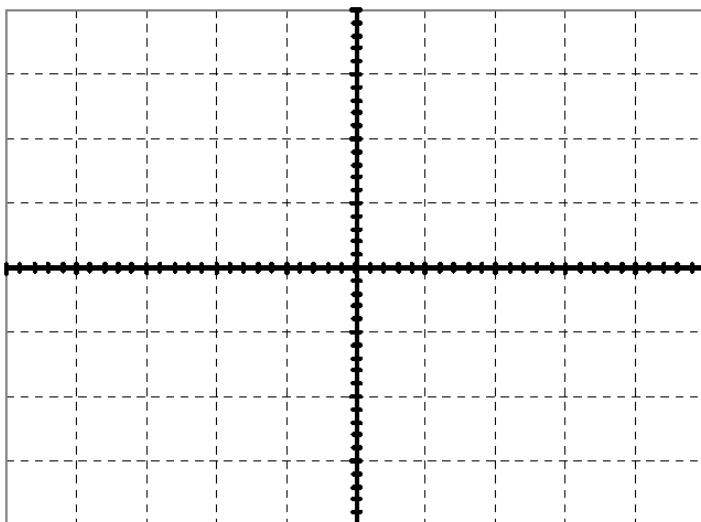
Časový průběh



Vertikální rozlišení:

Horizontální rozlišení:

Amplitudové spektrum



Vertikální rozlišení:

Horizontální rozlišení:

$B_{min} =$

## C VZOROVÉ VYPRACOVÁNÍ

### 1: Základní parametry:

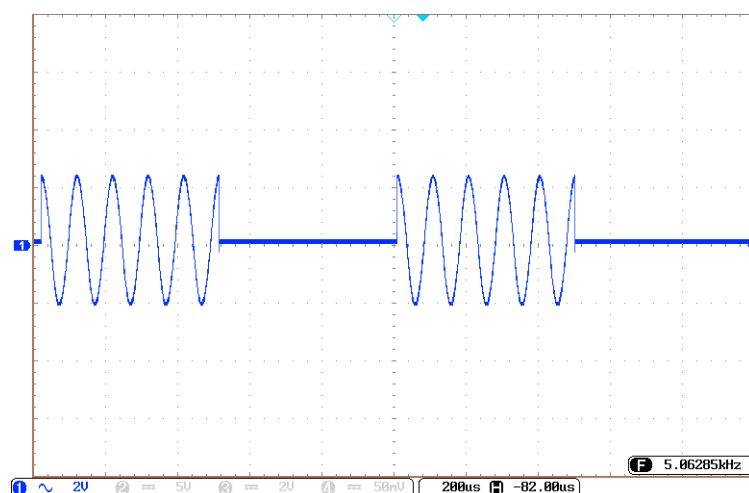
$$f_0 = 10,1 \text{ kHz}$$

$$R_1 = 2 \text{ kbit/s}$$

$$R_2 = 5 \text{ kbit/s}$$

### 2: ASK

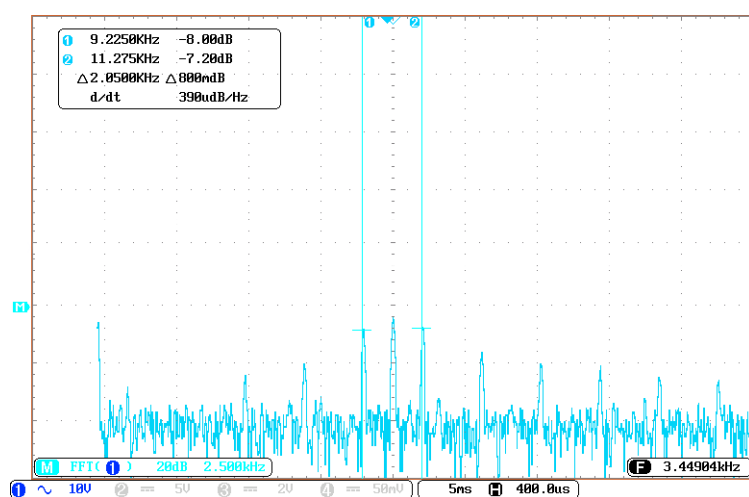
Časový průběh



Vertikální rozlišení: 2 V/div

Horizontální rozlišení: 200 us/div

Amplitudové spektrum



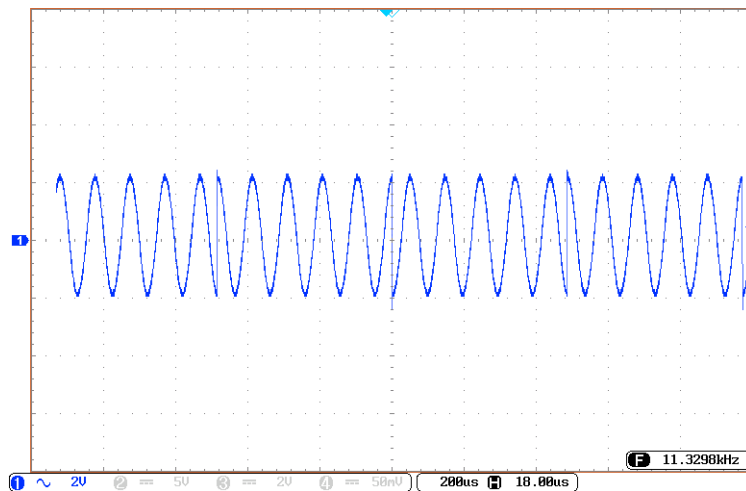
Vertikální rozlišení: 20 dB/div

Horizontální rozlišení: 2,5 kHz/div

$$B_{min} = 2 \text{ kHz}$$

### 3: BPSK

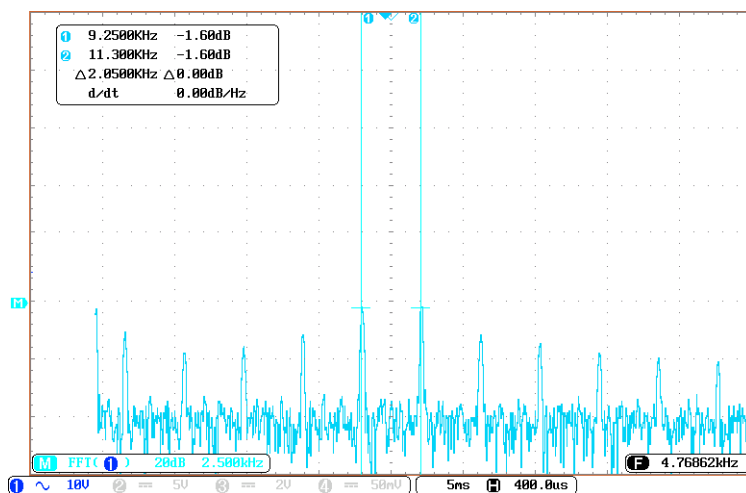
Časový průběh



Vertikální rozlišení: 2 V/div

Horizontální rozlišení: 200 us/div

Amplitudové spektrum



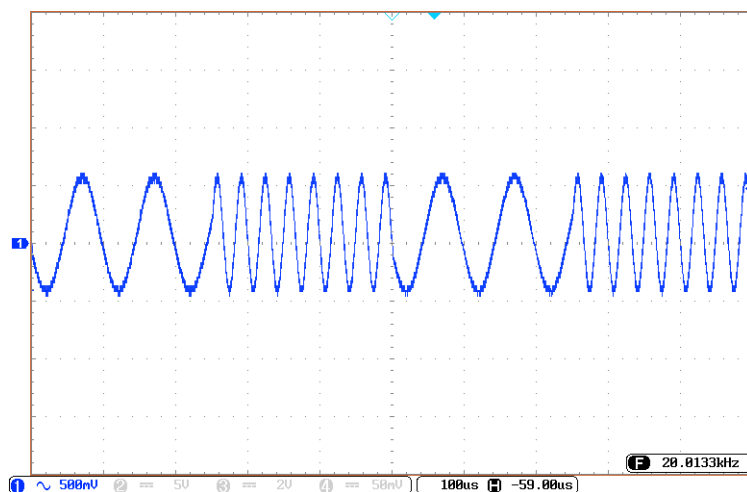
Vertikální rozlišení: 20 dB/div

Horizontální rozlišení: 2,5 kHz/div

$$B_{min} = 2 \text{ kHz}$$

#### 4: FSK

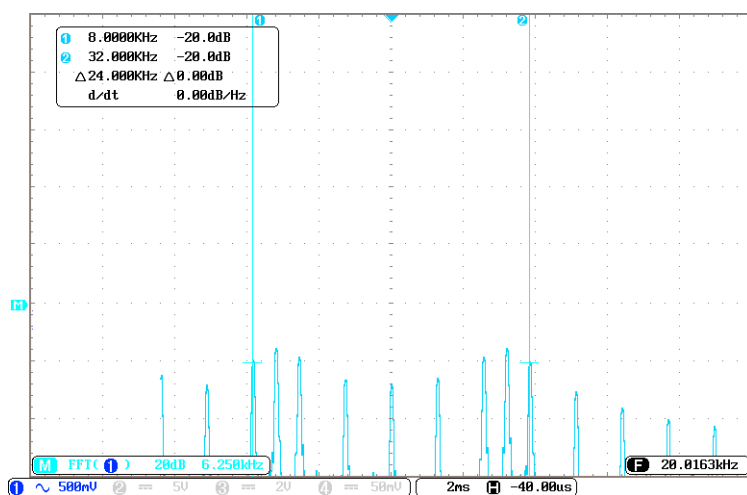
Časový průběh



Vertikální rozlišení: 500 mV/div

Horizontální rozlišení: 100 us/div

Amplitudové spektrum

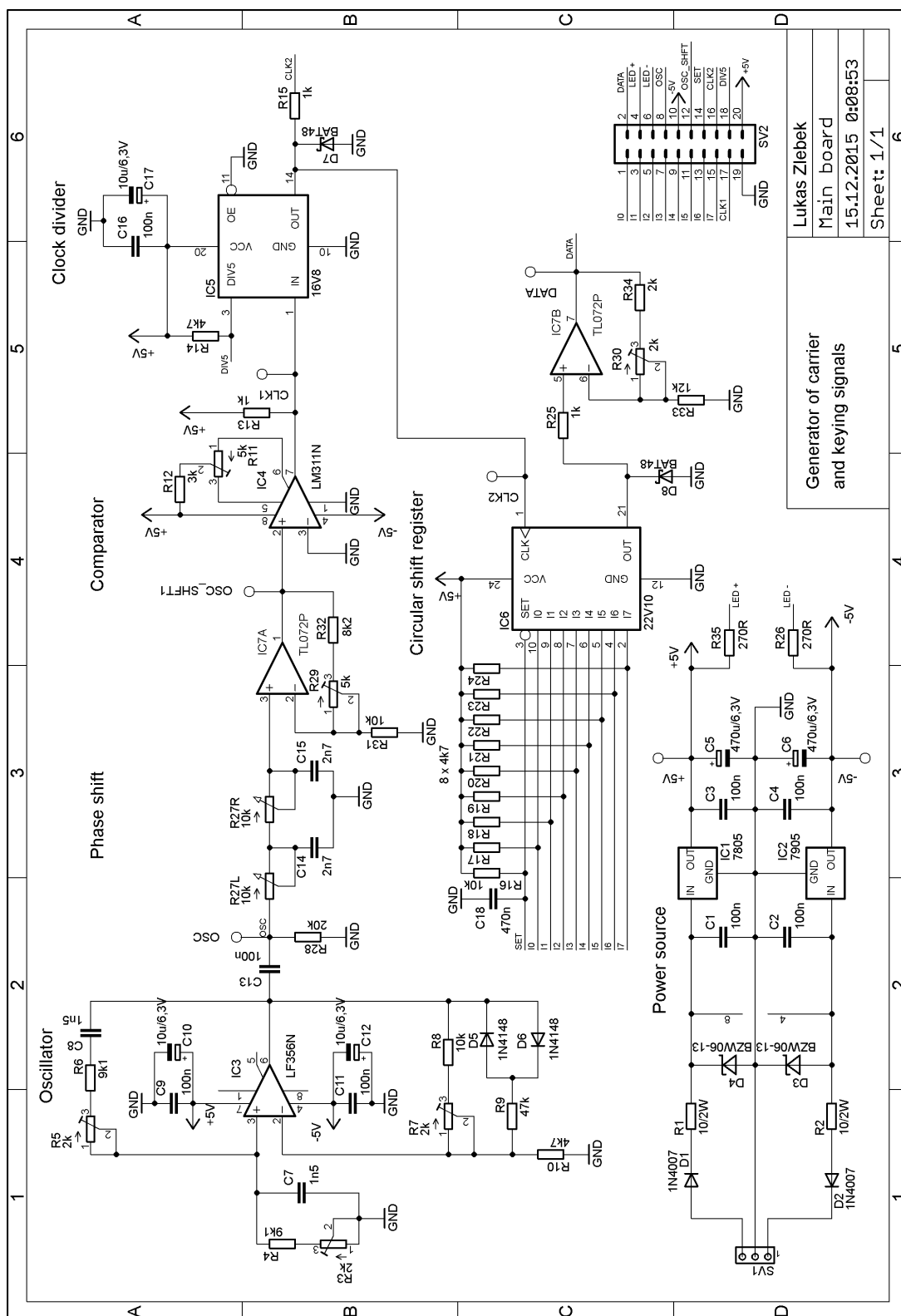


Vertikální rozlišení: 20 dB/div

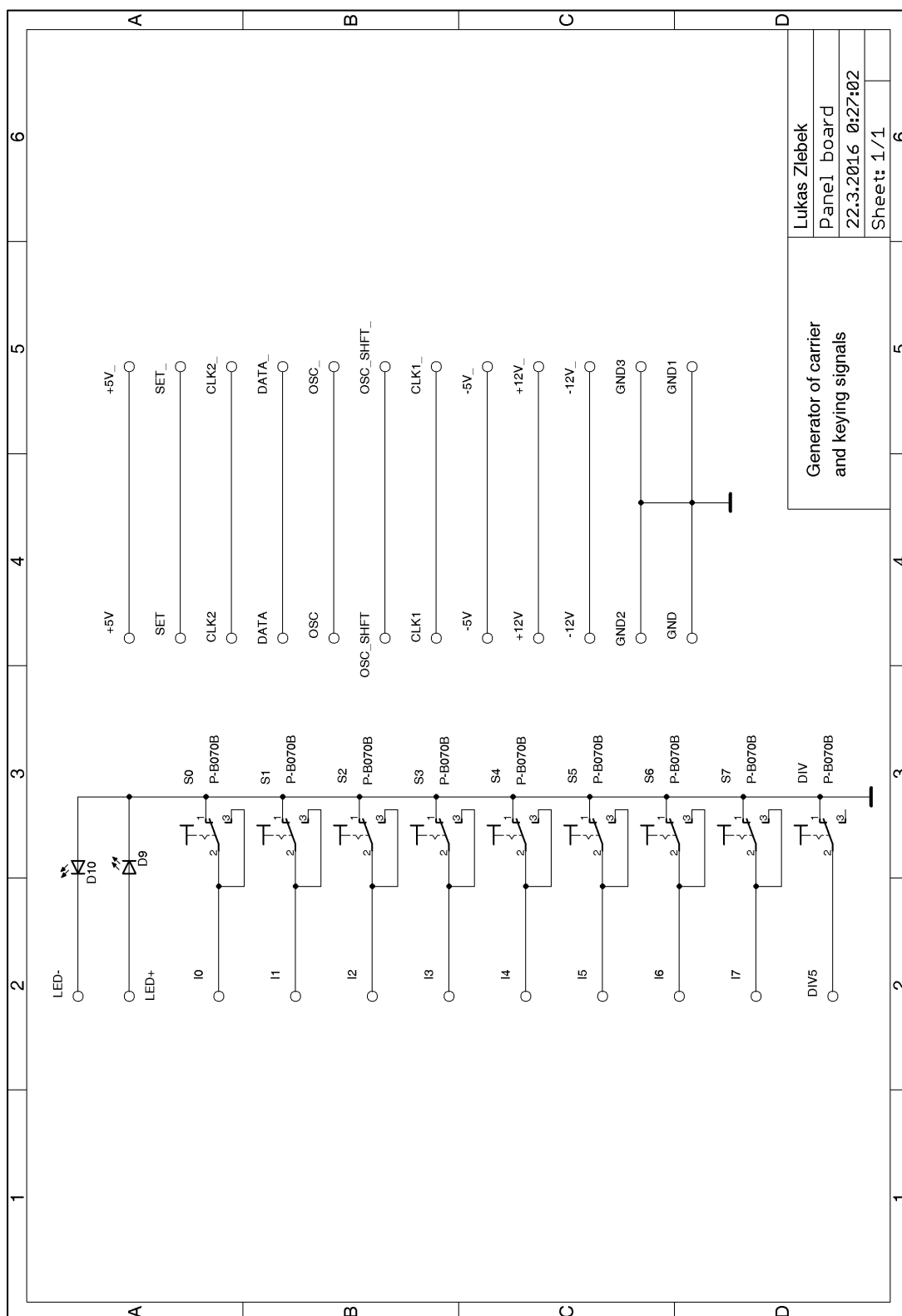
Horizontální rozlišení: 6,25 kHz/div

$$B_{min} = 24 \text{ kHz}$$

# D SCHÉMATA

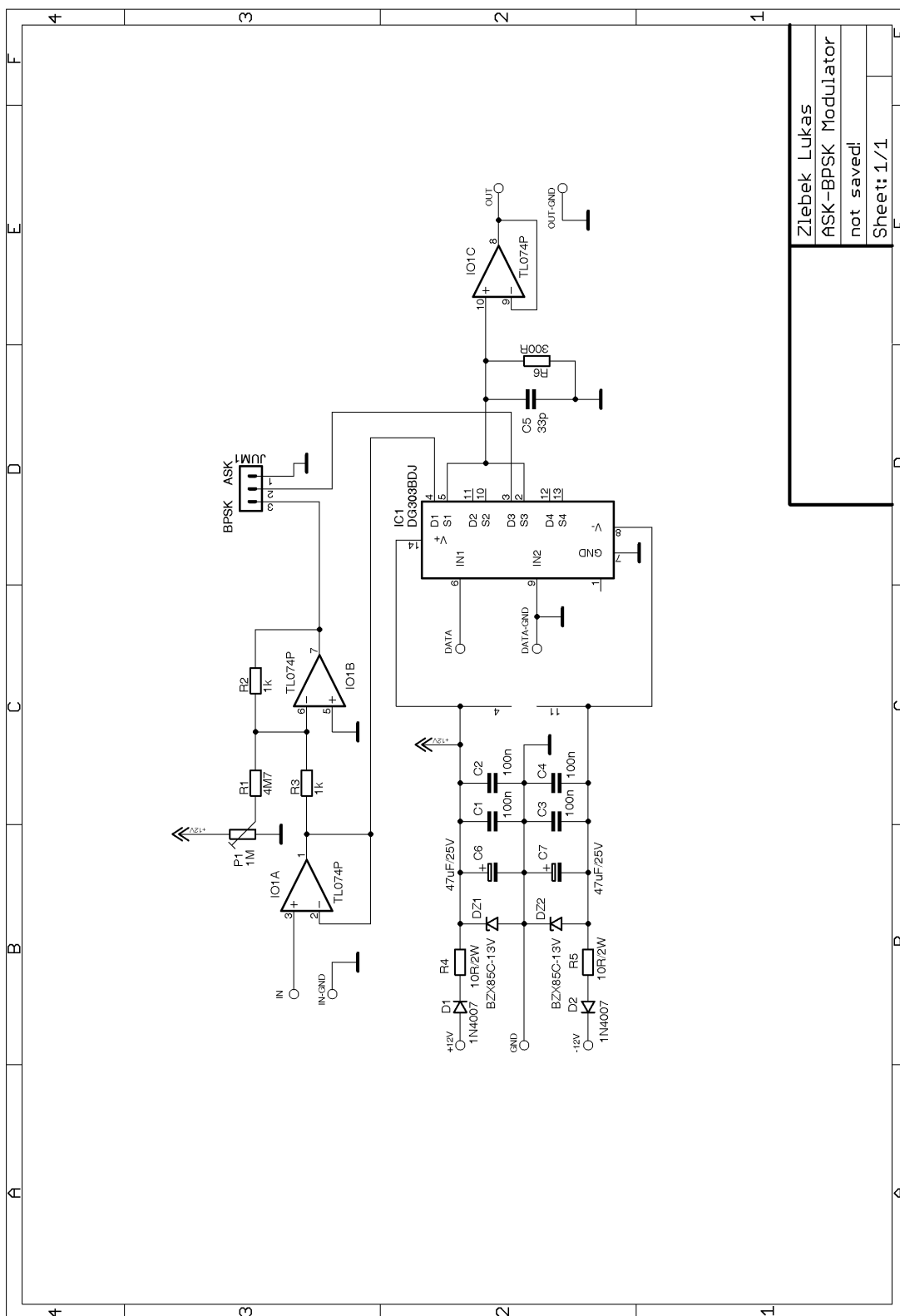


Obr. D.1: Schéma základní desky generátoru.



Obr. D.2: Schéma pomocné desky generátoru.

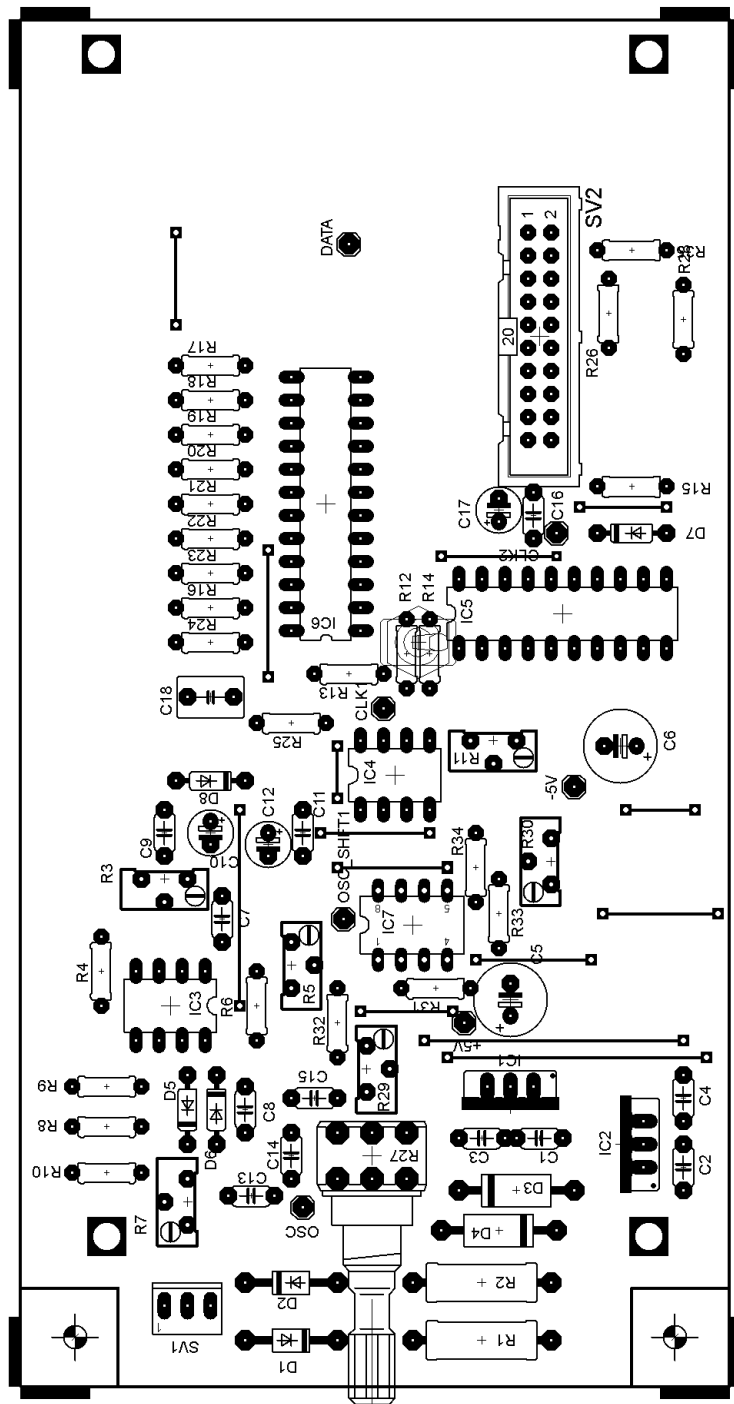




Zlábek Lukáš  
ASK-BPSK Modulator  
not saved!  
Sheet: 1/1

Obr. D.3: Schéma desky ASK a BPSK modulátoru.

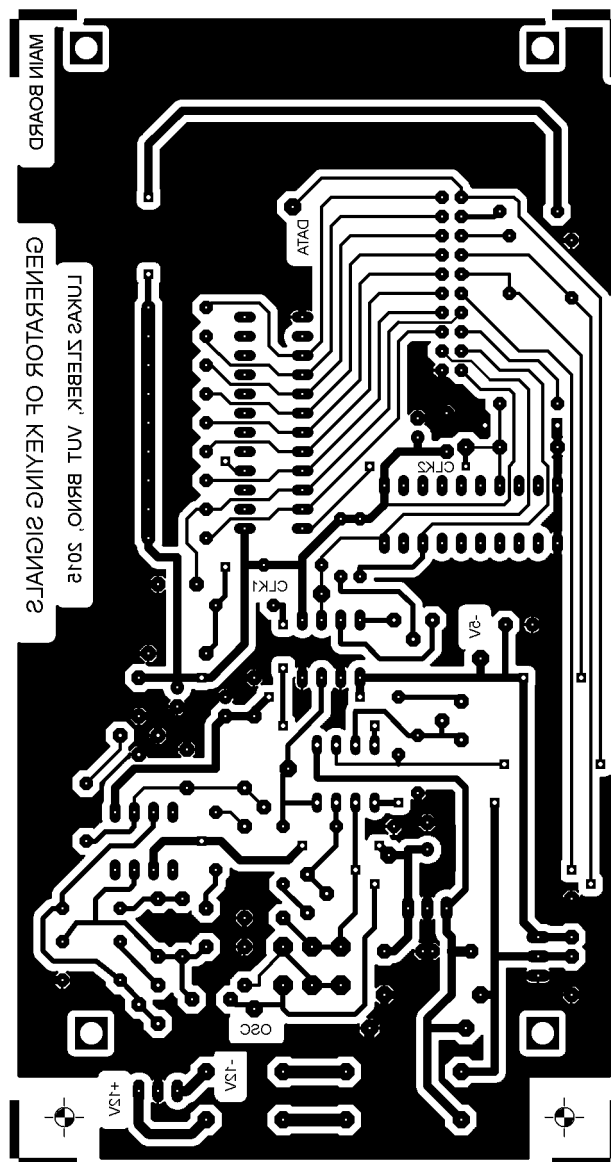
## E OSAZOVACÍ PLÁNY



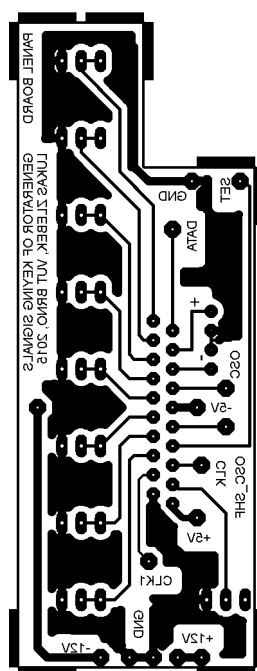
Obr. E.1: Osazovací plán hlavní desky generátoru.



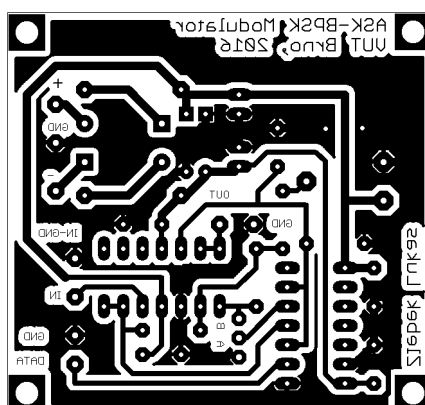
## F DESKY PLOŠNÝCH SPOJŮ



Obr. F.1: DPS hlavní desky generátoru v měřítku 1:1, skutečný rozměr je 150,5x78 mm.

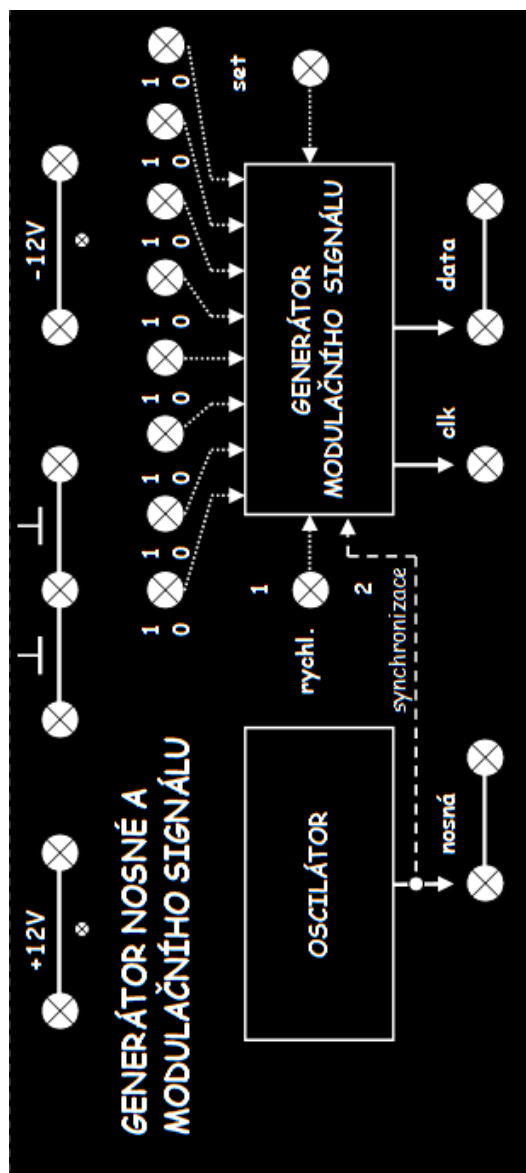


Obr. F.2: DPS pomocné desky generátoru v měřítku 1:1, skutečný rozměr je 85x35,5 mm.

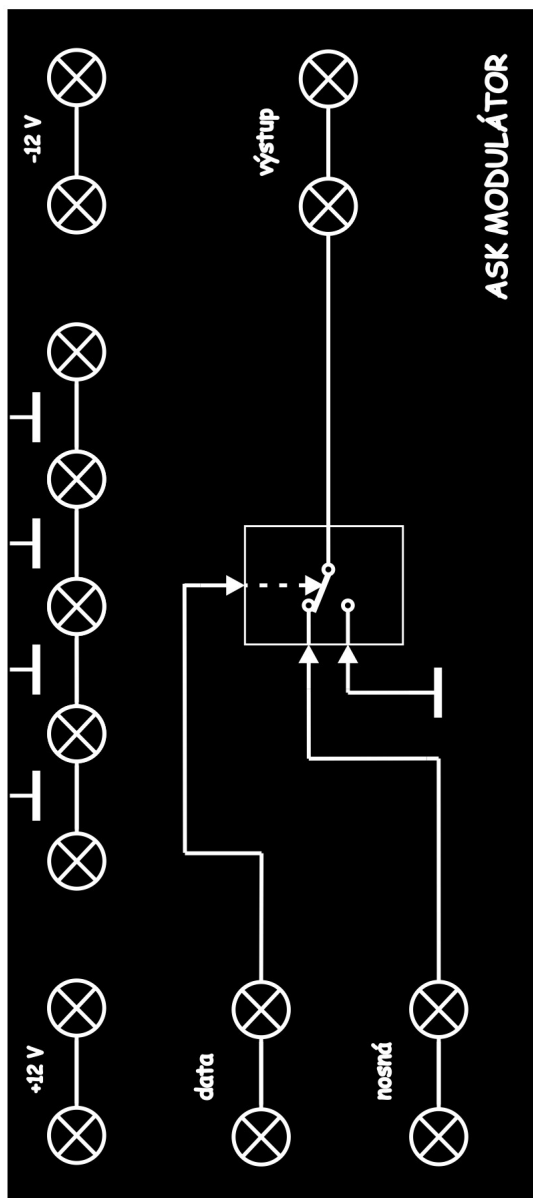


Obr. F.3: DPS ASK a BPSK modulátoru v měřítku 1:1, skutečný rozměr je 56x52 mm.

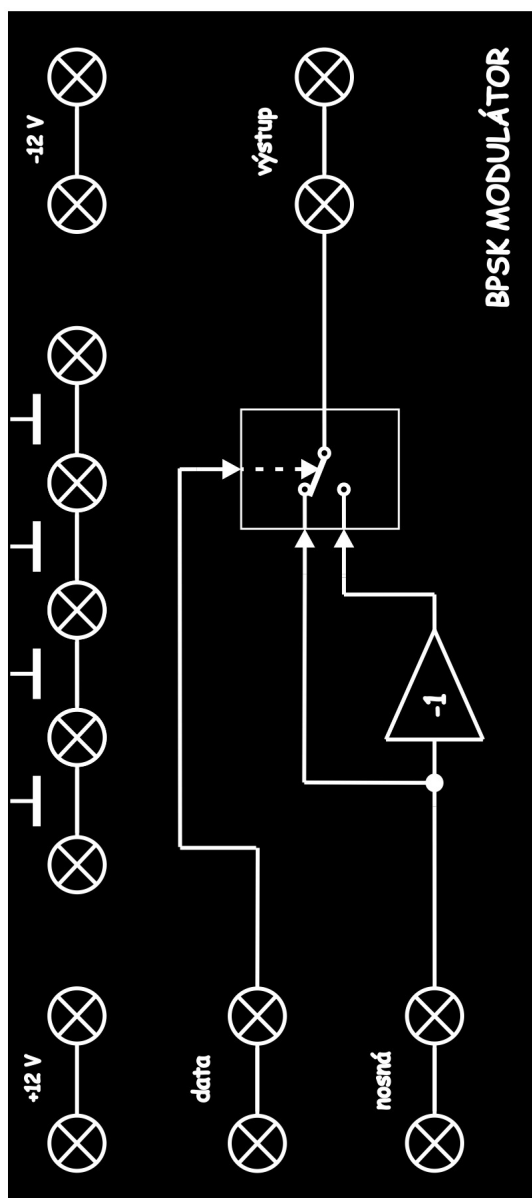
## G POTISKY PANELŮ



Obr. G.1: Potisk panelu generátoru v měřítku 1:1, skutečný rozměr je 152x68 mm.



Obr. G.2: Potisk panelu ASK modulátoru v měřítku 1:1, skutečný rozměr je 152x68 mm.



Obr. G.3: Potisk panelu BPSK modulátoru v měřítku 1:1, skutečný rozměr je 152x68 mm.



## H ROZPISKA SOUČÁSTEK GENERÁTORU

Součástka	Hodnota	Typ	Počet
R <sub>1,2</sub>	10R/2W	0414	2
R <sub>3,5,7,30</sub>	2k	64Y2KCN	4
R <sub>4,6</sub>	9k1	0207	2
R <sub>8,16,31</sub>	10k	0207	3
R <sub>9</sub>	47k	0207	1
R <sub>10,14,17,18,19,20,21,22,23,24</sub>	4k7	0207	10
R <sub>11,29</sub>	5k	64Y5KCN	2
R <sub>12</sub>	3k	0207	1
R <sub>13,15,25</sub>	1k	0207	3
R <sub>26,35</sub>	270R	0207	2
R <sub>27</sub>	10k	PC1622NK010	1
R <sub>28</sub>	20k	0207	1
R <sub>32</sub>	8k2	0207	1
R <sub>33</sub>	12k	0207	1
R <sub>34</sub>	2k	0207	1
C <sub>1,2,3,4,9,11,13,16</sub>	100nF	CK RM5	8
C <sub>5,6</sub>	470uF/6,3V	CE RM3,5	2
C <sub>7,8</sub>	1n5	CK RM5	2
C <sub>10,12,17</sub>	10u/6,3V	CE RM2,5	3
C <sub>14,15</sub>	2n7	CK RM5	2
C <sub>18</sub>	470n	CK RM5	1
D <sub>1,2</sub>	1N4007	D041	2
D <sub>3,4</sub>	BZW06-13B15V	D015	2
D <sub>5,6</sub>	1N4148	D035	2
D <sub>7,8</sub>	BAT48	D035	2
D <sub>9,10</sub>	LED GREEN	3mm	2

Součástka	Hodnota	Typ	Počet
IC <sub>1</sub>	7805	T0220	1
IC <sub>2</sub>	7905	T0220	1
IC <sub>3</sub>	LF356N	DIP8	1
IC <sub>4</sub>	LM311N	DIP8	1
IC <sub>5</sub>	GAL16V8	DIP20	1
IC <sub>6</sub>	GAL22V10	DIP24	1
IC <sub>7</sub>	TL072P	DIP8	1
Patice:			
	DIL08PZ		3
	DIL20PZ 7,5		1
	DIL24PZ 7,5		1
Přístrojová zdírka:			
	SBZ RED		2
	SBZ GREEN		3
	SBZ BLUE		2
	SBZ WHITE		5
Spínače:			
	P-PB303B RED		1
	P-B070B		9
Konektory:			
	MLW 20G		1
	PFL 20		1
	PSH02-03PG		1
	PFH02-03P		1
	PFF02-01FG	piny	3
	S1G10 2.54mm		1
Kabel	AWG28-20H		1
Krabička	KP29 (Z-38)		1

# I ROZPISKA SOUČÁSTEK ASK A BPSK MODULÁTORU

Součástka	Hodnota	Typ	Počet
R1	4M7	0207	1
R2,3	1k	0207	2
R4,5	10R/2W	0414	2
R6	300R	0207	1
P1	1M	PT10V	1
C1,2,3,4	100nF	CK RM5	4
C5	33p	CK RM5	1
C6,7	47u/25V	CE RM2,5	2
D1,2	1N4007	D041	2
DZ1,2	BZX85C-13V	D041	2
IC1	DG303BDJ	DIL14	1
IO1	TL074P	DIL14	1
Patice	DIL14PZ		2
Přístrojová zdířka:			
	SBZ RED		2
	SBZ GREEN		5
	SBZ BLUE		2
	SBZ WHITE		6
Piny	S1G3 2.54mm		1
Jumper	2.54mm		1
Krabička	KP29 (Z-38)		1

## **J OBSAH PŘILOŽENÉHO CD**

Na přiloženém CD se nachází schémata a návrh DPS v programu Eagle 5.11.0. Dále programy použitých obvodů GAL16V8 a GAL22V10 ve formátu Verilog a Jedec. Dále návrhy potisku panelů krabiček a nakonec i tento text v pdf souboru.